



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MARCIA TIEMI YAMASAKI

INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO E DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE DOIS SOLOS

Bauru
2012

MARCIA TIEMI YAMASAKI

**INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO NA AVALIAÇÃO DA
COMPACTAÇÃO E DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE DOIS SOLOS**

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

Orientador: Prof. Dr^a. Anna Silvia
Palcheco Peixoto

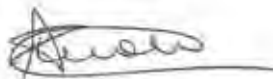
Bauru
2012



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

Aos 11 dias do mês de maio do ano de 2012, às 09:00 horas, no(a) SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA DO STI DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. VAGNER ROBERTO ELIS do(a) Departamento de Geofísica / Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP, Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MÁRCIA TIEMI YAMASAKI, intitulada "INFLUÊNCIA DA SALINIDADE DO FLUIDO NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO E DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE DOIS SOLOS". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO



Prof. Dr. VAGNER ROBERTO ELIS



Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES



Yamasaki, Marcia Tiemi.

Influência da salinidade do fluído na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos.
/ Marcia Tiemi Yamasaki, 2012
141 f.

Orientador: Anna Silvia Palcheco Peixoto

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Compactação. 2. Resistividade Elétrica. 3. Fluído de Percolação. 4. Curva de Retenção de Água. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

*“Ter um ideal é ter fé inabalável naquilo que não se vê,
mas cuja existência se aprende intuitivamente.”*

Masaharu Taniguchi

*Aos meus pais Kenichi e Mitiko,
pelo apoio e confiança em todas as etapas da minha Vida.*

*Ao meu irmão Kendi,
pelo exemplo de determinação e superação.*

AGRADECIMENTOS

À Prof. Anna Silvia Palcheco Peixoto, orientadora desta dissertação, pela dedicação e paciência desde a graduação. Agradeço ainda pela amizade e por ter proporcionado a mim a oportunidade de desenvolver todos os trabalhos acadêmicos aos quais de sonhos, hoje se tornaram realidade.

Ao Prof. Heraldo Luiz Giacheti pela orientação durante o estágio docência nas aulas de laboratório de mecânica dos solos, o que contribuiu para as análises dos ensaios.

Ao Prof. Roger Augusto Rodrigues pelo auxílio na técnica de ensaio de determinação da curva de retenção de água pelo método do papel filtro.

Aos Profs. George de Paula Bernardes e Prof. Júnio René T. Fagundes pelas sugestões apresentadas no exame de qualificação, sendo que estas contribuíram para a melhoria desta pesquisa.

Ao técnico do laboratório de mecânica dos solos da UNESP/Campus de Bauru, Gustavo Pinheiro pelo apoio técnico na elaboração e construção dos diversos equipamentos utilizados e ainda pelo auxílio em todos os ensaios realizados.

A aluna Luciana Campos pelo auxílio nos primeiros ensaios de determinação da curva de retenção de água pelo método do papel filtro.

Ao técnico do departamento de engenharia elétrica da UNESP/Campus de Bauru, Helton Roberto Gonzales pela confecção das placas de cobre utilizadas nos ensaios.

Ao técnico do departamento de engenharia civil da UNESP/Campus de Bauru, Tiago Duarte de Mattos pelo auxílio nos projetos dos equipamentos com o recurso de programas computacionais e ao técnico José Figueiredo pelo auxílio na coleta de amostras em Piracicaba.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UNESP/ Campus de Bauru, Guaratinguetá e Sorocaba, pela contribuição e nos ensinamentos tanto para este trabalho como para a minha formação.

À Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP/Campus de Bauru, por possibilitar a pós-graduação no curso de mestrado e fornecer a estrutura e os equipamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)/Capes, pela bolsa de estudos concedida.

Resumo

A resistividade elétrica vem sendo somada junto aos estudos de investigação geotécnica devido ao seu apelo ambiental, visto que esta técnica se dá por meio da imposição de um fluxo de corrente elétrica em uma amostra de solo, permitindo-se avaliar as condições geológicas locais por um método não destrutivo. A obtenção dessa medida vem sendo somada aos estudos de investigação geotécnica devido ao seu apelo ambiental, otimizando as amostragens e permitindo a avaliação das condições geológicas locais por meio de um método não destrutivo. Dessa maneira, o objetivo dessa dissertação de mestrado é avaliar, em laboratório, o comportamento da resistividade elétrica variando-se o teor de salinidade no fluido de percolação em dois solos tropicais: um arenoso, sedimentar, característico da região de Bauru, e outro argiloso, resultado do intemperismo do Diabásio, proveniente do município de Piracicaba. As análises foram realizadas utilizando-se resultados dos ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade e curva de retenção. O teor de salinidade do fluido foi considerado, tanto na compactação, como na percolação em três concentrações: água destilada, 250 ppm e 500 ppm de NaCl, além da água de abastecimento, controlando-se o teor de umidade, a compactação, o índice de vazios e o grau de saturação. Os resultados mostraram que a resistividade elétrica tende a ser constante no ramo úmido da curva de compactação e também quando o grau de saturação está acima de 80%. Notou-se também que a curva de resistividade *versus* sucção pode ser dividida em dois trechos: o primeiro corresponde às baixas sucções, com a continuidade da água nos poros e resistividades menores; o segundo trecho, que se inicia na primeira entrada de ar, conduz a um nítido aumento nos valores de resistividade. Os fatores de formação (FF) foram obtidos com os resultados dos ensaios de permeabilidade: 7,5 para o solo arenoso e 2,0 para o solo argiloso. As análises com a Lei de Archie foram realizadas utilizando-se os resultados dos ensaios da curva de retenção através da técnica do papel de filtro considerando-se apenas os valores com teor de umidade acima de 30%. Também, para cada solo, foram encontradas novas equações relacionando tanto o teor de umidade, como a sucção.

Palavras chaves: Compactação; Resistividade Elétrica; Fluido de Percolação; Curva de retenção de água.

ABSTRACT

The electrical resistivity of a homogeneous material could be defined as the measurement of the difficult of crossing of the electrical current and it depends of the dimension and type of material. However, when that material is soil, composed by three phases (solid, liquid and gas), this measure is influenced by several factors that could be controlled in laboratory tests. The electrical resistivity has been used with geotechnical research studies since this technique improve the sampling of environmental works and allowing the evaluation of local geological conditions through a non-destructive method. Thus, the goal of the study was evaluate the behavior of electrical resistivity of two tropical soils varying the salinity concentration in the percolation fluid: a sandy sediment, characteristic of the Bauru City; a clayey soil, weathered of Diabase from Piracicaba City. Results of soil mechanics laboratory tests as characterization tests, compaction, permeability and soil-water retention curve were used in the analyses. In both, compaction and permeability tests, the procedure were carried out varying the fluid salinity: distilled water; water supply; 250ppm and 500ppm of NaCl. The moisture content, compaction energy, void ratio and degree of saturation. The tests results showed the resistivity values tend to be constant in the wet density curve and when the degree of saturation is above 80%. It was also noted that the curve of resistivity suction could be divided into two segments: the first corresponds to low suctions where there is continuity of water in the porous leading to low resistivity values; the second segment begins in the first air entrance, with discontinuous state of pore-water and a sharply increase in the resistivity values. The Formation Factors (FF) were obtained during the permeability tests: 7,5 to the sandy soil and 2,0 to the clayey soil. The analyses using the Archie Law were done with the soil water soil-water retention curve results considered just the obtained values with 30% saturation degree or over. Thus, for each studied soil, a new electrical resistivity equation was done for both the moisture content as for the soil suction measurement.

Key words: compaction; electrical resistivity; percolation fluid; soil-water retention curve.

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
SUMÁRIO.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS.....	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CAMPO.....	4
3.2 MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO	5
3.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	17
3.3.1 <i>Fórmula de Archie</i>	18
3.3.2 <i>Análise da Lei de Archie</i>	31
3.3.3 <i>Sucção Matricial</i>	36
3.4 ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE BAURU E AEROPORTO ESTADUAL DE PIRACICABA “PEDRO MORGANTI”	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 COLETA DAS AMOSTRAS.....	50
4.2 CARACTERIZAÇÃO E ENSAIOS COMPLEMENTARES	52
4.3 EQUIPAMENTOS	72
4.3.1 <i>Cilindro de compactação</i>	73
4.3.2 <i>Painel de permeabilidade</i>	77
4.3.3 <i>Anéis e discos de PVC</i>	78
4.4 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	79
4.4.1 <i>Ensaio de Compactação</i>	79
4.4.2 <i>Ensaio de permeabilidade</i>	85
4.4.3 <i>Ensaio para a determinação da curva de retenção de água</i>	88
5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	96

5.1	VARIAÇÃO DO TEOR DE SALINIDADE DO FLUIDO	96
5.2	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	97
5.3	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	102
5.4	ENSAIOS DE SUÇÃO MATRICIAL	107
6	CONCLUSÕES	117
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
6.2	PROPOSTAS PARA ATIVIDADES FUTURAS	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

Índice de Figuras

Figura 3. 1 - Esquema do Piezocone de Resistividade <i>apud</i> GIACHETI <i>et al.</i> (2006)	4
Figura 3. 2 - Arranjo de Wenner	6
Figura 3. 3 - Arranjo Schlumberger	7
Figura 3. 4 - Gráfico do efeito da polarização nos eletrodos (WEEMES, 1990)	7
Figura 3. 5 - Esquema geral da caixa de solo Miller <i>apud</i> PAZ e CAMPELO (2005)	8
Figura 3. 6 - (a) Resistência e resistividade elétrica para uma amostra de solo retangular; (b) Relação entre a resistência e a Resistividade elétrica para uma amostra de solo cúbica com volume de 1cm ³ <i>apud</i> PAZ e CAMPELO (2005)	9
Figura 3. 7 - Vista superior da célula de resistividade	9
Figura 3. 8 - Célula para medidas sequenciais de resistividade, com oito eletrodos. (KALINSKY e KELLY, 1994)	10
Figura 3. 9 - Ensaio para determinação da resistência elétrica em amostras deformadas, <i>Soil Box</i> (BOSZCZOWSKI, 2008)	10
Figura 3. 10 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade elétrica (BOSZCZOWSKI, 2008)	11
Figura 3. 11 - Resistividade versus teor de umidade (BOSZCZOWSKI, 2008)	11
Figura 3. 12 - Diagrama esquemático do <i>Soil Box</i> incorporando uma haste cilíndrica com uma série de eletrodos instalados verticalmente, igualmente espaçados (OH <i>et al.</i> , 2008)	12
Figura 3. 13 – Mini-sensor de resistividade (PEIXOTO <i>et al.</i> , 2010)	13
Figura 3. 14 - Sistema de Calibração do Mini-sensor de Resistividade (PREGNOLATO e PEIXOTO, 2010)	13
Figura 3. 15 - Calibração do mini-sensor (YAMASAKI, 2009)	14
Figura 3. 16 – Curva de total de calibração. (Bollini e Peixoto, 2011, modificado)	14
Figura 3. 17 - Configuração do Ensaio com as Placas de Cobre (YAMASAKI <i>et al.</i> , 2010)	15
Figura 3. 18 - Configuração do ensaio de resistividade com o mini-sensor (YAMASAKI, 2009) .	15
Figura 3. 19 - Sistema para medidas da resistividade elétrica: (a) desenho esquemático da montagem e (b) imagem da realização das medidas. (AQUINO, 2010)	16
Figura 3. 20 - Desenho esquemático da preparação do corpo de prova para a medida de resistividade elétrica (AQUINO, 2010)	17
Figura 3. 21 - Mapa de resistividade aparente do JBB, obtido com arranjo de Wenner e espaçamento de 2 m entre eletrodos. Nascimento <i>et al</i> (2004)	20
Figura 3. 22 - Vista geral do talude e divisão das camadas (BOSZCZOWSKI, 2008)	21
Figura 3. 23 - Relação entre a Resistividade o Índice de vazios para amostras deformadas, mantendo-se o teor de umidade constante. (BOSZCZOWSKI, 2008)	21
Figura 3. 24 - Percolação de água em corpos-de-prova do ensaio de resistividade elétrica. (<i>apud</i> BOSZCZOWSKI, 2008)	22
Figura 3. 25 - Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para os diversos solos. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos. (<i>apud</i> Boszczowski, 2008)	23
Figura 3. 26 - Relação entre a condutividade elétrica e salinidade para as águas estudadas com a utilização de um gel no contato entre o solo e as placas. (<i>apud</i> Aquino, 2010)	25

Figura 3. 27 - Comparação entre a variação da resistividade elétrica do corpo de prova e da água frente a variação da salinidade da água. (<i>apud</i> Aquino, 2010)	25
Figura 3. 28 - Gráficos de resistividade elétrica versus temperatura com o condutivímetro para concentrações de (a) 1 ppm, (b) 20 ppm, (c) 50 ppm, (d) 100 ppm, (e) 200 ppm, (f) 500 ppm, (g) 1000 ppm e (h) 10.000 ppm. (KISHIMOTO, 2011)	27
Figura 3. 29 - Relação entre a Resistividade Elétrica e Teor de Umidade <i>apud</i> OH <i>et al.</i> (2008)...	28
Figura 3. 30 - Variação da resistividade com o teor de umidade e grau de saturação para os Solos Branco e Amarelo, deformados (BOSZCZOWSKI, 2008).....	29
Figura 3. 31 - Variação da resistividade com o teor de umidade e grau de saturação para os Solos Laranja e Vermelho, deformados (BOSZCZOWSKI, 2008)	30
Figura 3. 32 - Relação Linear entre Massa específica do Solo, o Teor de Umidade e a Resistividade Elétrica <i>apud</i> HASSONA <i>et al.</i> (2008).....	31
Figura 3. 33 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo ensaiadas com a solução salina a 1000ppm. (MONDELLI, 2008)	32
Figura 3. 34 – Estimativa do parâmetro “a” da Lei de Archie, utilizando-se solução salina a 1000ppm como fluido de percolação. (MONDELLI, 2008).....	34
Figura 3. 35 - Grau de Saturação Versus Relação entre Resistividade Não Saturada e Resistividade Quasi-Saturada para Água Destilada (YAMASAKI <i>et al.</i> , 2010).....	35
Figura 3. 36 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de papel filtro: a) secagem ao ar, b) umedecimento por gotejamento. (AQUINO, 2010).....	37
Figura 3. 37 – Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial para o corpo-de-prova 4N, referente ao ponto de umidade ótima para o Proctor normal. (AQUINO, 2010).....	38
Figura 3. 38 - Localização dos ensaios realizados no aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP <i>apud</i> MONDELLI <i>et al</i> (2006) modificado.....	39
Figura 3. 39 - (a) Eletorresistivímetro Syscal Pro utilizado por MONDELLI (2008) para obtenção de valores de resistividade em laboratório e (b) Detalhe do corpo de prova instrumentado para medida da resistividade elétrica em laboratório (MONDELLI, 2008).....	41
Figura 3. 40 - Resistividade em função do grau de saturação <i>apud</i> MONDELLI (2008).....	42
Figura 3. 41 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo percoladas com água de torneira <i>apud</i> MONDELLI (2008)	43
Figura 3. 42 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo percoladas com solução salina a 200ppm <i>apud</i> MONDELLI (2008)	43
Figura 3. 43 – Curva de compactação obtida por Yamasaki (2009)	44
Figura 3. 44 - Foto do local da coleta (Silva, 2006).....	45
Figura 3. 45 - Curva granulométrica (SILVA, 2006).....	46
Figura 3. 46 - Curva de compactação (SILVA, 2006)	47
Figura 3. 47 – Representação gráfica dos valores de mini-CBR (Silva, 2006).....	47
Figura 3. 48 – Representação gráfica das curvas de expansão e retração (Silva, 2006)	47
Figura 3. 49 – Ensaio de compactação da amostra argilosa (Silva, 2006).	48
Figura 3. 50 - Número de golpes x afundamento (Silva, 2006).	49
Figura 3. 51 – Mini-MCV x perda por imersão (Silva, 2006).....	49
Figura 4. 1 - Foto aérea da localização do aterro de resíduos sólidos de Bauru. (Google maps 2010)	51
Figura 4. 2 - Fotos do talude pelo qual foi extraída a amostra em Bauru.	51
Figura 4. 3 - Localização da coleta do solo: Via Comendador Pedro Morganti - Entrada para o Aeroporto Estadual de Piracicaba. (Google maps 2010)	52

Figura 4. 4 - Fotos do talude pelo qual foi extraída a amostra em Piracicaba.....	52
Figura 4. 5 - Dispensador de solos e balão volumétrico com a amostra de solo e água destilada.	54
Figura 4. 6 – Sistema com a bomba de vácuo para retirada de ar da mistura de solo com água destilada.....	54
Figura 4. 7 - Curva granulométrica com e sem defloculante.	55
Figura 4. 8 - Foto dos materiais utilizados nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.	56
Figura 4. 9 - Foto da execução do ensaio de proctor normal.	58
Figura 4. 10 - Curva de compactação por Proctor normal	58
Figura 4. 11 - Fotos da montagem do equipamento de determinação da capacidade de suporte.	59
Figura 4. 12 - Foto do ensaio de mini-CBR colocado para retração.	60
Figura 4. 13 - Foto do ensaio de mini-CBR colocado para expansão.	60
Figura 4. 14 - Curva de compactação do ensaio de Mini-CBR.....	61
Figura 4. 15 - Curva de expansão e retração do ensaio de mini-CBR.....	62
Figura 4. 16 - Foto do ensaio de perda por imersão.	63
Figura 4. 17 - Curvas de compactação do ensaio de mini MCV.....	64
Figura 4. 18 – Carta da metodologia MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).....	65
Figura 4. 19 - Foto dos materiais para execução do ensaio de azul de metileno.....	66
Figura 4. 20 – Foto da montagem do equipamento para ensaio de azul de metileno.....	66
Figura 4. 21 – Valor de azul do solo (Vb), em função da porcentagem de argila, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, PEJON (1992) <i>apud</i> (Bonini, 2005).....	68
Figura 4. 22 - Foto do resultado do papel filtro com o solo Bauru e com o solo Piracicaba pelo método de Pejon.....	69
Figura 4. 23 - Ábaco para caracterização da atividade da fração argila dos solos, FABBRI (1994) <i>apud</i> BONINI (2005)	71
Figura 4. 24 - Foto do resultado do papel filtro com o solo Bauru e com o solo Piracicaba pelo método de Fabbri.....	72
Figura 4. 25 – Projeto do cilindro sem escala com as medidas em milímetros.....	73
Figura 4. 26 – Equipamento para o ensaio de compactação.....	74
Figura 4. 27 – Mini-cilindro de compactação e modelo do cilindro grande.	74
Figura 4. 28 – Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade no mini-cilindro.....	75
Figura 4. 29 – Detalhe da tampa e do ralo superior.	75
Figura 4. 30 – Projeto da tampa e do ralo superior sem escala e com as medidas em milímetros...	76
Figura 4. 31 – Coeficiente de permeabilidade a 20°C pelo tempo de ensaio.....	76
Figura 4. 32 – Foto do painel de permeabilidade a carga variável.....	77
Figura 4. 33 – Conjunto de dez anéis de PCV.....	78
Figura 4. 34 – Anel com par de discos.....	78
Figura 4. 35 – Projeto dos anéis e bolachas sem escala com medidas em milímetros.	78
Figura 4. 36 – Comparação entre as curvas de compactação do Proctor normal e mini-cilindro com o Solo Bauru.....	80
Figura 4. 37 – Comparação entre as curvas de compactação do Proctor normal e do mini-cilindro com as abraçadeiras.....	80
Figura 4. 38 – Foto dos equipamentos utilizados para leitura da resistividade.....	81
Figura 4. 39 – Foto do reservatório de água com capacidade para 38 litros.	82

Figura 4. 40 – Verificação da condutividade do líquido com o condutivímetro da marca Thermo scientific/orion 3 star.....	83
Figura 4. 41 – Foto das amostras homogeneizadas e deixadas em repouso por no mínimo 24 horas.	83
Figura 4. 42 – Montagem do circuito para aquisição das leituras de corrente e voltagem.....	84
Figura 4. 43 – Ligação do cilindro ao sistema com o sobrepeso.....	86
Figura 4. 44 – Detalhe do tanque inferior com orifício de escape.	87
Figura 4. 45 – Sequência para montagem do permeâmetro, sem escala.	87
Figura 4. 46 – Equipamentos do ensaio para compactação e extração dos corpos-de-prova.	89
Figura 4. 47 - Alguns equipamentos do ensaio para determinação da curva de retenção de água... ..	89
Figura 4. 48 – Posicionamento das placas.....	90
Figura 4. 49 – Posicionamento dos anéis para saturação.	91
Figura 4. 50 – Processo de secagem das amostras e pesagem das massas.....	92
Figura 4. 51 – Proteção dos corpos-de-prova com sua respectiva identificação e armazenados dentro do isopor.....	92
Figura 4. 52 – Estrutura montada para o ensaio de aquisição da resistividade em conjunto com a sucção matricial.....	93
Figura 4. 53 – (a)Aquisição da corrente e voltagem e (b) medida da temperatura no corpo-de-prova.	94
Figura 4. 54 – Recipiente plástico com a cápsula acomodada.	94
Figura 5. 1 – Relação da condutividade elétrica com a concentração de NaCl dissolvido.	96
Figura 5. 2 – Curva de compactação dos ensaios com o mini-cilindro independente da solução no Solo Bauru.....	97
Figura 5. 3 – Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o Solo Bauru.....	97
Figura 5. 4 – Curvas de compactação dos ensaios com o mini-cilindro no Solo Piracicaba	99
Figura 5. 5 - Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o Solo Piracicaba.	99
Figura 5. 6 – Variação da resistividade elétrica versus teor de umidade considerando o índice de vazios do Solo Bauru.	100
Figura 5. 7 - Variação da resistividade elétrica versus teor de umidade considerando o índice de vazios do Solo Piracicaba.....	101
Figura 5. 8 – Variação da resistividade em relação ao grau de saturação em cada ponto da curva de compactação do Solo Bauru.	101
Figura 5. 9 - Variação da resistividade em relação ao grau de saturação em cada ponto da curva de compactação do Solo Piracicaba.	102
Figura 5. 10 – Variação da resistividade elétrica em função do grau de saturação antes e após o ensaio de permeabilidade no Solo Bauru.	105
Figura 5. 11 - Variação da resistividade elétrica em função do grau de saturação antes e após o ensaio de permeabilidade no Solo Piracicaba.	105
Figura 5. 12 – Variação da resistividade em função do tempo de fluxo da solução.	106
Figura 5. 13 – Curvas de retenção de água no Solo Bauru.	108
Figura 5. 14 - Curvas de retenção de água no Solo Piracicaba.	108
Figura 5. 15 – Tentativa de obtenção do parâmetro “b” da equação de Archie no Solo Bauru.	109
Figura 5. 16 – Nova equação para a tentativa de obter o parâmetro “b” da Lei de Archie para o Solo Bauru.	109

Figura 5. 17 - Tentativa de obtenção do parâmetro “ b ” da equação de Archie no Solo Piracicaba.	110
Figura 5. 18 - Nova equação para a tentativa de obter o parâmetro “ b ” da Lei de Archie para o Solo Piracicaba.	110
Figura 5. 19 – Ajuste da Lei de Archie no Solo Bauru para a água destilada.	111
Figura 5. 20 – Ajuste da Lei de Archie no Solo Bauru para a água de abastecimento.	112
Figura 5. 21 - Ajuste da Lei de Archie no Solo Piracicaba para a água destilada.	112
Figura 5. 22 - Ajuste da Lei de Archie no Solo Piracicaba para a água de abastecimento.	113
Figura 5. 23 - Resistividade em função da sucção matricial para o Solo Bauru.	114
Figura 5. 24 - Resistividade em função da sucção matricial para o Solo Piracicaba.	114
Figura 5. 25 - Resistividade em função do teor de umidade para o Solo Bauru.	115
Figura 5. 26 - Resistividade em função do teor de umidade para o Solo Piracicaba.	115

Índice de Tabelas

Tabela 3. 1 - Solução salina e sua respectiva faixa de variação da resistividade elétrica com a temperatura de 10°C a 30°C. (KISHIMOTO, 2011).....	26
Tabela 3. 2 – Dados da resistividade em um corpo-de-prova compactado e os valores dos parâmetros encontrados por Daniel (1997, modificada)	33
Tabela 3. 3 – Parâmetros de cimentação (m) e saturação (b) da Lei de Archei estimados por Mondelli (2008) para as amostras de solo estudadas em laboratório.	35
Tabela 3. 4 - Curva de calibração para o papel filtro Whatman 42 (BICALHO <i>et al.</i> , 2007)	37
Tabela 3. 5 - Classificação das amostras de solo estudadas em laboratório (MONDELLI, 2008) ..	40
Tabela 3. 6 - Faixa de variação dos valores de resistividade encontrados por Mondelli (2008) para as amostras de solo estudadas em laboratório.	42
Tabela 3. 7 - Fatores de Formação (FF) obtidos por Mondelli (2008) para as amostras percoladas com diferentes fluidos.	44
Tabela 3. 8 – Parâmetros do ensaio de mini-MCV (Yamasaki, 2009).....	45
Tabela 3. 9 - Valores de índices físicos obtidos para solo argiloso. (SILVA, 2006)	46
Tabela 3. 10 - Parâmetros do ensaio de mini-MCV (Silva <i>et al.</i> , 2006)	48
Tabela 4. 1 - Normas e métodos referentes aos ensaios.....	53
Tabela 4. 2 – Resultados obtidos no ensaio de granulometria conjunta das amostras com e sem defloculante.	56
Tabela 4. 3 - Limites de consistência	57
Tabela 4. 4 – Resultados do ensaio de compactação.....	59
Tabela 4. 5 – Valores numéricos das propriedades (NOGAMI e VILLIBOR, 1995 modificada)...	61
Tabela 4. 6 - Valores da umidade ótima ($w_{ótima}$), massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d\max}$), e os correspondentes $CBR_{natural}$, $CBR_{inundado}$, expansão e retração obtidos no ensaio de mini-CBR ...	62
Tabela 4. 7 - Valores do grau de argilosidade (c'), coeficiente d' , grau de laterização (e') e da perda por imersão (P_i).....	65
Tabela 4. 8 - Capacidade de troca de cátions de diferentes tipos de argilas, obtida por métodos tradicionais (Beaulieu, 1979) <i>apud</i> Pejon (1992).....	68
Tabela 4. 9 - Cálculo e análises do ensaio de azul de metileno pelo método de Pejon.....	69
Tabela 4. 10 – Classificação da atividade da fração argila pelo método de Fabbri (1994)	71
Tabela 4. 11 - Valores de azul (V_a) e coeficiente de atividade (CA), em função da superfície específica. (FABBRI, 1994).....	71
Tabela 4. 12 - Classificação da fração fina das amostras pelo método de Fabbri (1994)	72
Tabela 5. 1 – Valores médios obtidos nos ensaios de compactação variando-se o teor de salinidade do fluido.	98
Tabela 5. 2 – Valores do coeficiente de permeabilidade para os diferentes fluidos a 20°C.....	102
Tabela 5. 3 – Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para o Solo Bauru.	103
Tabela 5. 4 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para o Solo Piracicaba.	104
Tabela 5. 5 – Fator de formação para o Solo Bauru.....	107

Tabela 5. 6 - Fator de formação para o Solo Piracicaba.....	107
Tabela 5. 7 – Dados das equações referente a Lei de Archie para os dois fluidos.....	113

1 INTRODUÇÃO

A técnica de resistividade elétrica que tem sido usada para caracterizar o ambiente geológico quanto ao fraturamento, à saturação e para a identificação litológica. Nos últimos anos, tem sido utilizada também na detecção de áreas contaminadas. No entanto, não existe, ainda, uma padronização para a utilização desta ferramenta na área ambiental. Tem-se, como resultado disto, uma dificuldade na obtenção de resultados adequados para essa finalidade. Contudo, o emprego de sondagem com o piezocone de resistividade (RCPTU) e amostradores especiais de água, solo e gás, juntamente com uma campanha de geofísica superficial, tem apresentado resultados promissores nos países da Europa e América do Norte. (BOLINELLI JUNIOR *et al.*, 2002)

A resistividade elétrica é uma propriedade dos materiais que quantifica a relação existente entre a diferença de potencial elétrico aplicado e a intensidade de corrente que percorre a unidade de volume desse material, de acordo com a Lei de Ohm. (MIRANDA *et al.* 1997) No entanto, se tratando de um material heterogêneo como o solo, composto por três fases distintas: sólido; líquido e gasoso, esta medida é influenciada por diversos fatores que em laboratório podem ser controlados ou minimizados. Tais como: teor de umidade, grau de saturação, índice de vazios, teor de salinidade do fluido, entre outros.

Por meio dessa dissertação de mestrado, se pretende dar continuidade aos estudos de laboratório já iniciados na graduação. Inicialmente, o objetivo era a avaliação da resistividade elétrica utilizando dois dispositivos de medição: inicialmente colocando-se as placas circulares de cobre em cada extremidade do corpo-de-prova e o outro com o mini-sensor semelhante ao piezocone padrão de resistividade em proporções menores.

Nesta dissertação de mestrado, a avaliação da resistividade elétrica foi realizada em duas amostras de solo distintas, ou seja, um solo arenoso, sedimentar, com características típicas da região de Bauru, e outro argiloso, resultado do intemperismo do Diabásio, proveniente do município de Piracicaba. E assim buscou-se a obtenção de valores de referência controlando-se o teor de umidade, índice de vazios, grau de saturação e variando-se a salinidade do fluido de percolação.

Para esse estudo, como ambas as amostras foram compactadas, deve-se deduzir que, ao se realizar um ensaio de resistividade em um solo não saturado, este sofrerá a influência do teor de umidade. Espera-se nessa situação, condutividades baixas e resistividades altas. Por outro lado, em corpos-de-prova completamente saturados, os valores de condutividade/resistividade são constantes e influenciados pela salinidade da água.

Para tanto, a leitura da resistividade real foi registrada com duas placas de cobre posicionadas horizontalmente nas extremidades do corpo-de-prova cilíndrico. Assim, avaliou-se o seu comportamento segundo três procedimentos diferentes:

- Em cada ponto da curva de compactação, em ensaio realizado em cilindro de *tecnyl* com dimensões do equipamento utilizado nos ensaios de mini-MCV e mini-CBR, e com a mesma energia do proctor normal;
- Em duas situações: compactada na umidade ótima e após percolação do fluido por um sistema semelhante ao ensaio permeabilidade a carga variável;
- E em cada ponto da curva de retenção de água pela técnica do papel filtro com o corpo-de-prova compactado em energia próxima ao proctor normal com teor de umidade ótimo.

Dessa maneira, os resultados assim obtidos irão colaborar para o desenvolvimento de uma pesquisa mais extensa cujo objetivo é mostrar ao meio técnico uma maneira racional de se obter valores de referência de resistividade elétrica, auxiliando as análises de ensaios de campo, associados a ensaios de laboratório que mostrem com segurança a necessidade, ou não, de se detalhar a investigação geo-ambiental.

2 OBJETIVOS

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo a avaliação resistividade elétrica de dois solos tropicais. Assim foram definidos como objetivos específicos os estudos do comportamento da medida de resistividade elétrica:

- na curva de compactação, em cilindro de *tecnyl* com dimensões do equipamento utilizado nos ensaios de mini-MCV e mini-CBR, e com a mesma energia do proctor normal;
- na amostra compactada na umidade ótima e após a percolação do mesmo fluido por um sistema semelhante ao ensaio permeabilidade a carga variável;
- na curva de retenção de água pela técnica do papel filtro com o corpo-de-prova compactado no teor de umidade ótimo com energia próximo a do proctor normal;
- em dois solos variando-se a salinidade no fluido de percolação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão abordados os principais assuntos relacionados à pesquisa. Inicialmente, uma breve introdução do conceito da medida de resistividade obtida em campo, e também serão apresentadas as técnicas de leitura dessa medida em laboratório, que foram de fundamental importância para a definição do equipamento a ser utilizado e a sua metodologia.

Na sequência, coletaram-se informações relacionadas à medida de resistividade elétrica em amostras de solo e os principais fatores a que poderiam influenciar, com o intuito de auxiliar na interpretação dos resultados. Assim como os fatores relacionados com o fluido de percolação, pois o estudo está diretamente ligado à variação do teor de salinidade do meio líquido.

3.1 Medida da Resistividade Elétrica em Campo

O piezocone de resistividade, ou piezocone resistivo, RCPTU, consiste em um módulo de resistividade que é instalado atrás do piezocone padrão, **Figura 3. 1** Este recurso permite medir continuamente a resistência a um fluxo de corrente elétrica aplicada ao solo.



Figura 3. 1 - Esquema do Piezocone de Resistividade *apud* GIACHETI *et al.* (2006)

A resistividade elétrica (ou condutividade elétrica, eq. 01) é medida por um par de eletrodos montados no fuste do cone.

$$\text{Condutividade } (\mu\text{S|cm}) = \frac{10000}{\text{Resistividade } (\Omega.\text{m})} \quad (01)$$

De acordo com a lei de Ohm, a resistência elétrica (R), pode ser calculada através da eq. 02:

$$R = \frac{V}{I} \quad (02)$$

sendo V, a voltagem medida em um par de eletrodos alimentado por uma corrente elétrica constante, I.

A definição é válida quando ocorre a circulação de uma corrente elétrica através da aplicação de uma diferença de potencial entre os extremos do resistor. Qualquer material pode ser considerado um tipo de resistor, sendo que materiais que possuem resistência muito alta ao fluxo de corrente elétrica são classificados como isolantes ou isoladores. A resistência elétrica do solo pode ser calculada pelas suas características físicas, ou seja, a sua resistência é proporcional ao comprimento do resistor e à resistividade do material (propriedade do material), e inversamente proporcional à área da seção transversal, eq. 03.

$$R = \frac{\rho.l}{A} \quad (03)$$

no qual: ρ é a resistividade do material; l é o comprimento; e A é a área da seção transversal.

A resistividade elétrica é uma propriedade física de cada substância, relacionada com a maior ou menor dificuldade de passagem de corrente elétrica através desta substância. A resistividade é expressa em unidade de resistência elétrica multiplicada por unidade de comprimento ($\Omega.\text{m}$). (KOEFOED, 1979)

3.2 Medida da Resistividade Elétrica em Laboratório

Para se determinar a resistividade elétrica do solo, devem ser levadas em consideração diversas variáveis que interferem em sua medida, entre elas a geometria dos eletrodos e a frequência de medição da resistividade, além dos fatores inerentes à amostra a ser analisada.

Segundo Campanella e Weemes (1989), pequenas distâncias entre eletrodos, permite a detecção de camadas mais finas. Porém, a corrente elétrica circula na área que sofreu maior perturbação, sendo assim, o adensamento do solo produzido pela penetração do cone, por exemplo, afetaria as medidas de resistividade. Para maiores espaçamentos dos eletrodos, a resolução vertical

diminui, porém os resultados da resistividade são mais precisos, pois a corrente elétrica circula numa região menos perturbada do solo.

Grande parte desses equipamentos é construída com quatro eletrodos, pois quando utilizam apenas dois, ao trabalharem em baixas frequências, ficam sujeitos ao efeito de polarização e interferem em muito na leitura da resistividade. Entretanto, a medida que se trabalha com frequências mais altas esse efeito diminui pois os íons não conseguem se polarizar nos eletrodos (WEEMES, 1990).

A *American Society Technical Materials*, através da ASTM G57-95a descreve procedimentos tanto de campo, como de laboratório, para a medida de resistividade em solo usando quatro eletrodos através da configuração de Wenner, na qual eles são igualmente espaçados dispostos de acordo com a **Figura 3. 2**. A medida da resistividade aparente para esse arranjo é calculada através da eq. 04:

$$\rho_{ap} = 2a \frac{\Delta V}{I} \quad (04)$$

em que: ρ_{ap} é a resistividade aparente ($\Omega.m$); a é distância entre os eletrodos (m); ΔV é a diferença de potencial entre M e N (mV); I é a intensidade de corrente (mA).

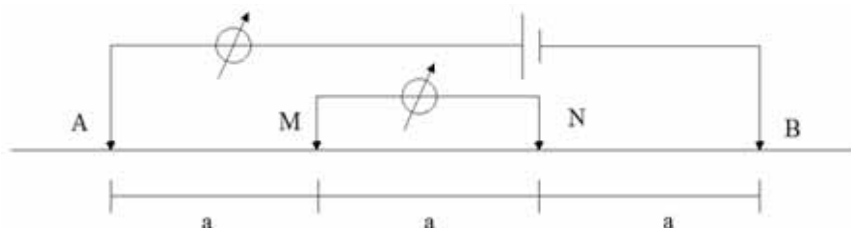


Figura 3. 2 - Arranjo de Wenner

No arranjo de Schlumberger, assim como no de Wenner, são utilizados quatro eletrodos, sendo dois eletrodos (AB) para transmissão de corrente elétrica, e os outros dois (MN) para leitura de potencial. Os eletrodos (MN) são fixos e os eletrodos (AB) possuem semi-espacamentos crescentes. Na **Figura 3. 3** está ilustrado o arranjo de Schlumberger, em que os eletrodos A e B são espaçados “2s” e MN, espaçados de “a”. Nesse caso, o cálculo da resistividade aparente é feito de acordo com a eq. 05, derivada a partir da lei de Ohm (TELFORD *et al.*, 1990).

$$\rho_{ap} = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) k\rho = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) K \quad (05)$$

em que: ρ_{ap} é a resistividade aparente ($\Omega.m$); ΔV é a diferença potencial medida (mV); I é a intensidade de corrente (mA); e k é o fator geométrico de escala. Sendo que o fator geométrico de escala (k) depende do tipo de arranjo de eletrodos utilizado, no caso do arranjo de Schlumberger esse fator é definido de acordo com a eq. 06:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} + \frac{1}{BM}\right)} \quad (06)$$

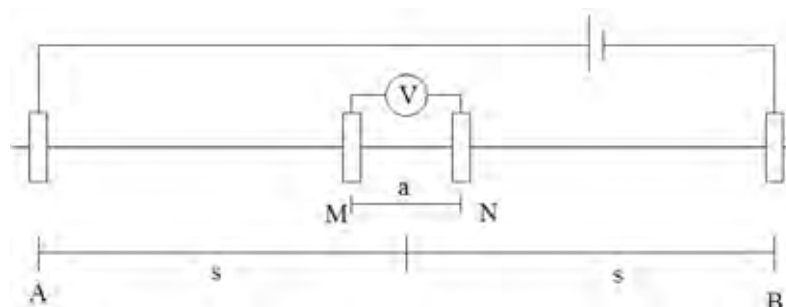


Figura 3. 3 - Arranjo Schlumberger

Na **Figura 3. 4** está ilustrado o efeito de polarização nos eletrodos, onde a resistividade foi normalizada de acordo com a eq. 07 e plotada num gráfico de resistividade normalizada no eixo das ordenadas e frequência nas abscissas.

$$\rho_n = \frac{\rho}{\rho_{1000}} \quad (07)$$

em que: ρ_n é a resistividade normalizada; ρ é a resistividade medida; e ρ_{1000} é a resistividade medida na frequência de 1000Hz.

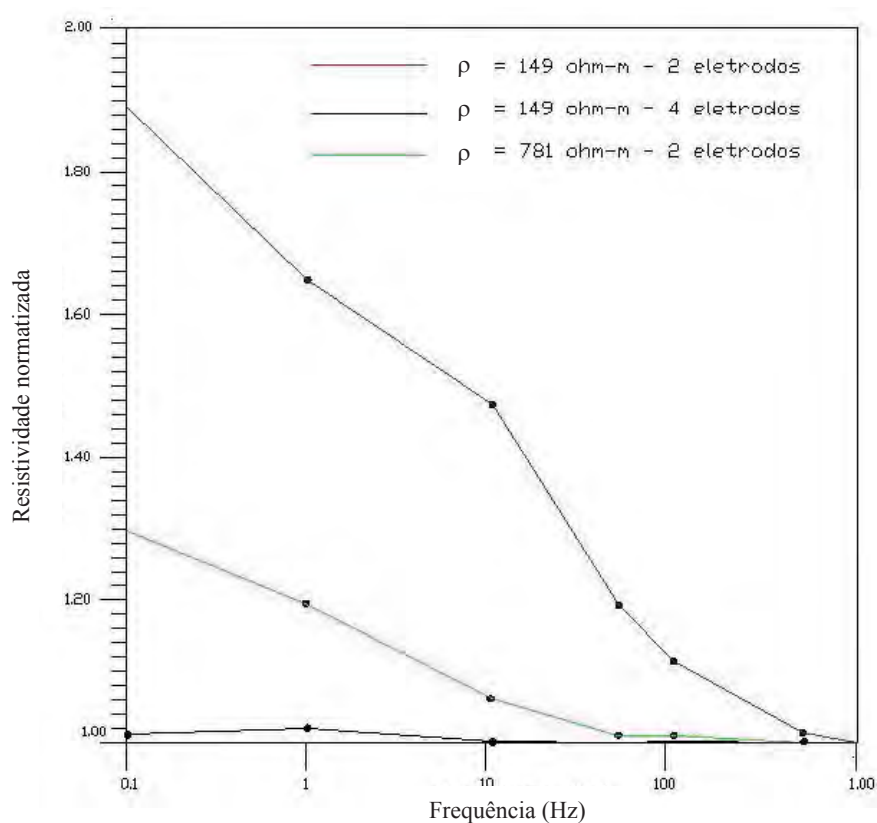


Figura 3. 4 - Gráfico do efeito da polarização nos eletrodos (WEEMES, 1990)

Existem duas configurações mais usuais para esse tipo de medida: Arranjo de Wenner e Arranjo de Schlumberger.

No entanto, segundo Paz e Campelo (2005), os ensaios da Caixa de Solo Miller (descrito na ASTM G 57-95a) e da Célula Circular de Investigação de Resistividade são os dois métodos mais recomendados para leitura de resistividade do solo em laboratório.

O ensaio da Caixa de Solo Miller, **Figura 3. 5**, consiste em uma pequena caixa plástica retangular com metal em suas extremidades e, dois pinos ao longo de seu comprimento que são inseridos nas amostras de solo compactadas no interior da caixa. Nela, uma corrente elétrica passa de uma extremidade a outra da caixa e os pinos inseridos na amostra calculam a voltagem no interior da mesma, tornando possível a medida da resistividade da amostra de solo. A resistividade assim obtida está demonstrada na eq. 08:

$$\rho_0 = \frac{W.H.R}{L} \quad (08)$$

em que: ρ_0 é a resistividade da amostra ($\Omega.cm$); W é largura da caixa (cm); H é a altura da caixa (cm); R é a resistência medida (Ω); e L é a distância interna entre os pinos (cm).

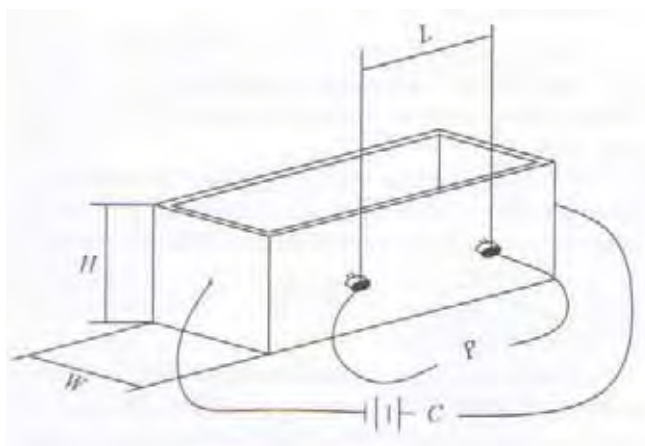


Figura 3. 5 - Esquema geral da caixa de solo Miller *apud* PAZ e CAMPELO (2005)

Quando a caixa possui forma cúbica de aresta de 1cm, a resistividade da amostra, que é expressa em $\Omega.m$ é igual à medida de resistência em ohms, ou seja, a resistividade é numericamente igual à resistência do solo, **Figura 3. 6** e eq 10:

$$\rho_0 = \frac{W.H.R}{L} = \frac{1.1.R}{1} \rightarrow \rho_0 = R \quad (04)$$

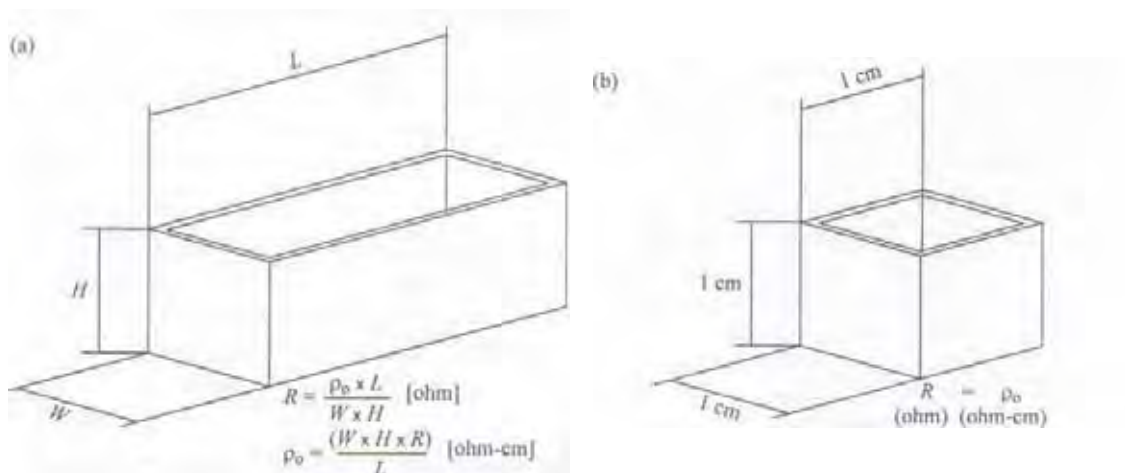


Figura 3. 6 - (a) Resistência e resistividade elétrica para uma amostra de solo retangular; (b) Relação entre a resistência e a Resistividade elétrica para uma amostra de solo cúbica com volume de 1cm³ *apud* PAZ e CAMPELO (2005)

O ensaio da Célula Circular de Investigação de resistividade, desenvolvida por Kalinsky e Kelly (1994), é feito com uma célula circular de material isolante, com oito eletrodos igualmente espaçados inseridos na lateral da amostra, **Figura 3. 7** e **Figura 3. 8**.

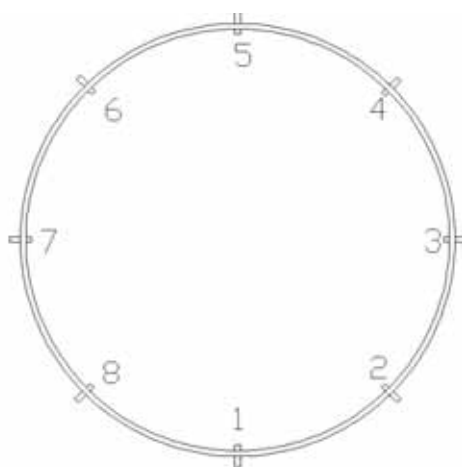


Figura 3. 7 - Vista superior da célula de resistividade

Para obtenção das medidas são utilizados dois pares de eletrodos, sendo um mais extremo para passagem de corrente e um interno para aplicação da tensão. Desse modo, podem-se obter oito medidas individuais de resistência elétrica, a cada quatro eletrodos, ao longo da parede da célula. Esse ensaio pode ser feito com amostras deformadas ou indeformadas.

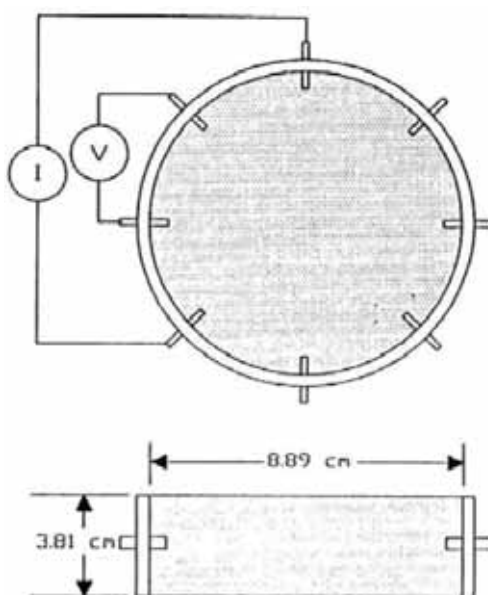


Figura 3. 8 - Célula para medidas sequenciais de resistividade, com oito eletrodos. (KALINSKY e KELLY, 1994)

Com o objetivo principal de caracterizar solos residuais e o intemperismo dos mesmos através da resistividade elétrica, Boszczowski (2008) subdividiu seu estudo de maneira a avaliar: a influência da estrutura na condutividade elétrica; a influência da composição química dos solos na condutividade elétrica e a relação entre resistividade e sucção. Para tanto realizou no laboratório ensaios de resistividade em amostras deformadas e indeformadas.

Para a avaliação da resistividade em relação ao índice de vazios em diferentes amostras desestruturadas, o solo destorreado foi compactado estaticamente sem a variação do teor de umidade em três estados de densidade, e colocado em uma caixa padrão, Soil Box, de dimensões 120mm de comprimento, 50mm de altura e 50mm de largura, **Figura 3. 9**. As laterais de dimensões menores feitas de material acrílico e nas maiores, feitas de cobre, foram fixados cabos para a passagem da corrente elétrica. A resistência foi obtida através da eq. 02.



Figura 3. 9 - Ensaio para determinação da resistência elétrica em amostras deformadas, *Soil Box* (BOSZCZOWSKI, 2008)

Para o estudo com as amostras indeformadas, os corpos de prova foram moldados em tubos de PVC de 50mm a 75mm de diâmetro e 100mm a 150mm de altura. Em cada extremidade do tubo foi colocada uma placa de bronze e aplicada à diferença de potencial seguindo a configuração da **Figura 3. 10**. Para a primeira determinação da resistência, os corpos de prova foram secos ao ar e para as demais, os mesmos foram umedecidos por vapor d'água e deixados em repouso por dois dias antes das leituras. Após atingirem o grau de saturação desejado, sendo que o valor máximo atingido foi próximo de 70%, os corpos-de-prova foram secos em estufa para a determinação do teor de umidade. A resistividade foi obtida multiplicando-se o valor da resistência pela área de transmissão da corrente elétrica (área de solo perpendicular ao fluxo de corrente elétrica) e dividindo-se pela distância entre as placas de bronze (altura do PVC).

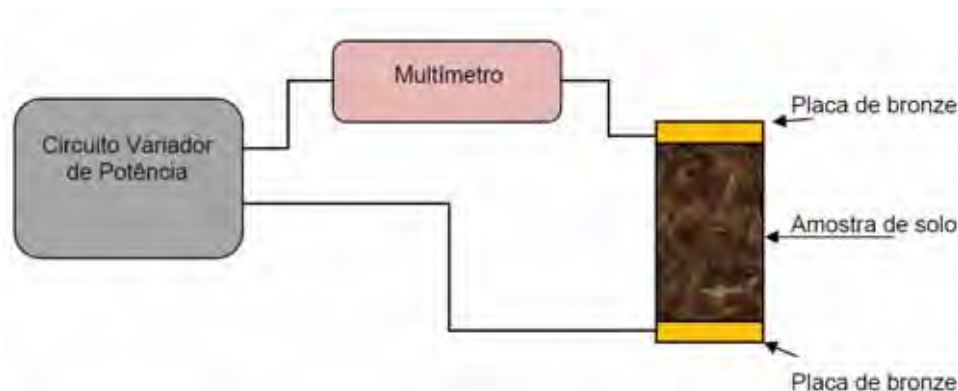


Figura 3. 10 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade elétrica (BOSZCZOWSKI, 2008)

Boszczowski (2008) adotou a seguinte metodologia para a determinação da resistência: para cada teor de umidade, ajustou uma reta passando pela origem com corrente elétrica versus diferença de potencial. Assim, obteve a variação da resistividade do solo com o teor de umidade através de um gráfico exemplificado na **Figura 3. 11**.

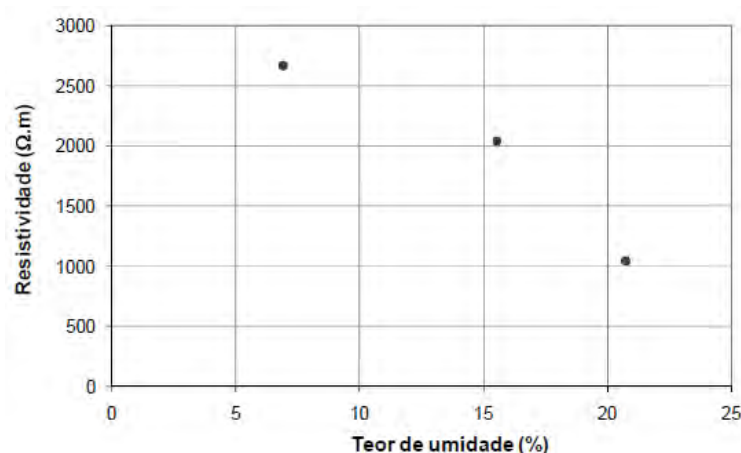


Figura 3. 11 - Resistividade versus teor de umidade (BOSZCZOWSKI, 2008)

Outro estudo interessante de laboratório para avaliar a sensibilidade do cone de resistividade face ao teor de umidade e a diferentes tipos de contaminantes foi realizado por Oh *et al.* (2008). Uma caixa cilíndrica foi construída e instalado em seu centro uma haste, também cilíndrica, com uma série de eletrodos instalados a cada 2cm verticalmente, vide **Figura 3. 12**, com o objetivo de simular as leituras do RCPTU em função da profundidade, porém durante a execução do ensaio houve perturbação do solo no entorno causada pela gravação do equipamento.

De modo a evitar a interferência de borda no desenvolvimento da aplicação do campo elétrico, a caixa foi concebida com medidas equivalentes a 15 vezes o espaçamento entre os eletrodos. Assim tais dimensões estão de acordo com estudos de Van Nostrand e Cook (1966), que relatam que 70% do fluxo de corrente elétrica induzida a partir de um par de eletrodos colocados na superfície se desenvolve dentro de uma profundidade equivalente à distância entre os eletrodos.

Um estudo teórico para a obtenção do fator geométrico tridimensional foi realizado derivando-se a lei de Ohm, chegando a eq. 10:

$$G = \frac{\pi d}{4 \ln \left(\frac{2\pi d + 8s}{\pi d - 8s} \right)} \quad (5)$$

em que: G é o fator geométrico tridimensional; d é diâmetro do eletrodo em anel; e s é distância de separação entre dois eletrodos adjacentes.

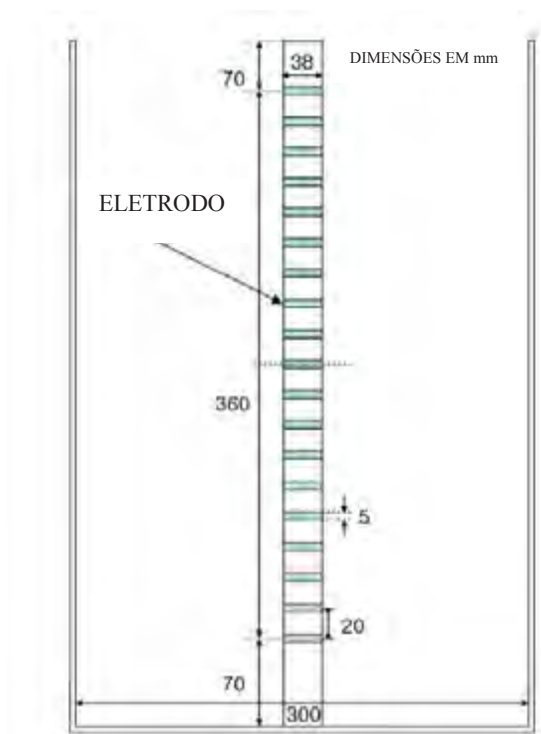
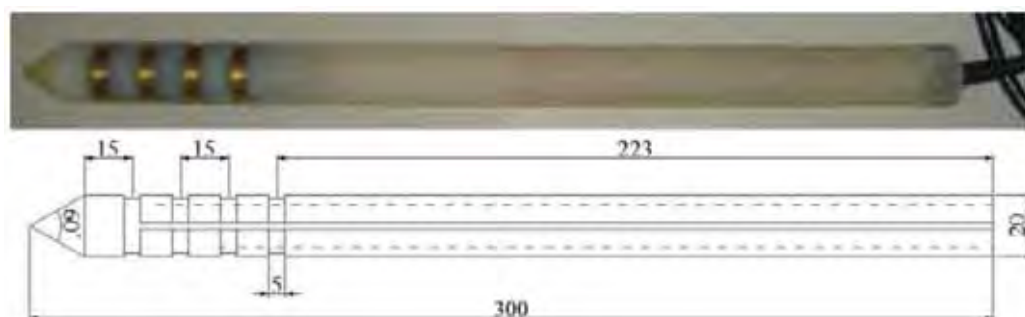


Figura 3. 12 - Diagrama esquemático do Soil Box incorporando uma haste cilíndrica com uma série de eletrodos instalados verticalmente, igualmente espaçados (OH *et al.*, 2008)

Peixoto *et al.* (2010) desenvolveram um mini-sensor com a configuração semelhante ao piezocone (com dimensões menores) com o intuito de avaliar a resistividade elétrica dos solos em laboratório, conforme **Figura 3. 13**. No entanto, o equipamento se restringe apenas a esta medida, pois não possui dispositivos acoplados que forneçam as medidas de resistências de ponta e lateral, assim como a poro-pressão.



medidas em mm

Figura 3. 13 – Mini-sensor de resistividade (PEIXOTO *et al.*, 2010)

A calibração do equipamento foi realizada adicionando-se quantidades pré-determinadas de sal em um tanque preenchido com água destilada de volume conhecido, conforme a **Figura 3. 14**.



Figura 3. 14 - Sistema de Calibração do Mini-sensor de Resistividade (PREGNOLATO e PEIXOTO, 2010)

Assim, analogamente a Bang *et al.* (2008) plotou-se com os primeiros dados obtidos, o gráfico da **Figura 3. 15** e obteve-se a equação 11 de calibração do mini-sensor de resistividade elétrica, sendo que o seu coeficiente de determinação foi muito próximo a 1. Dessa maneira, Yamasaki (2009) pode calcular os valores de resistividade elétrica do solo proveniente do aterro de resíduos sólidos de Bauru, amostra característica da região, para cada par de valores medidos no voltímetro e amperímetro.

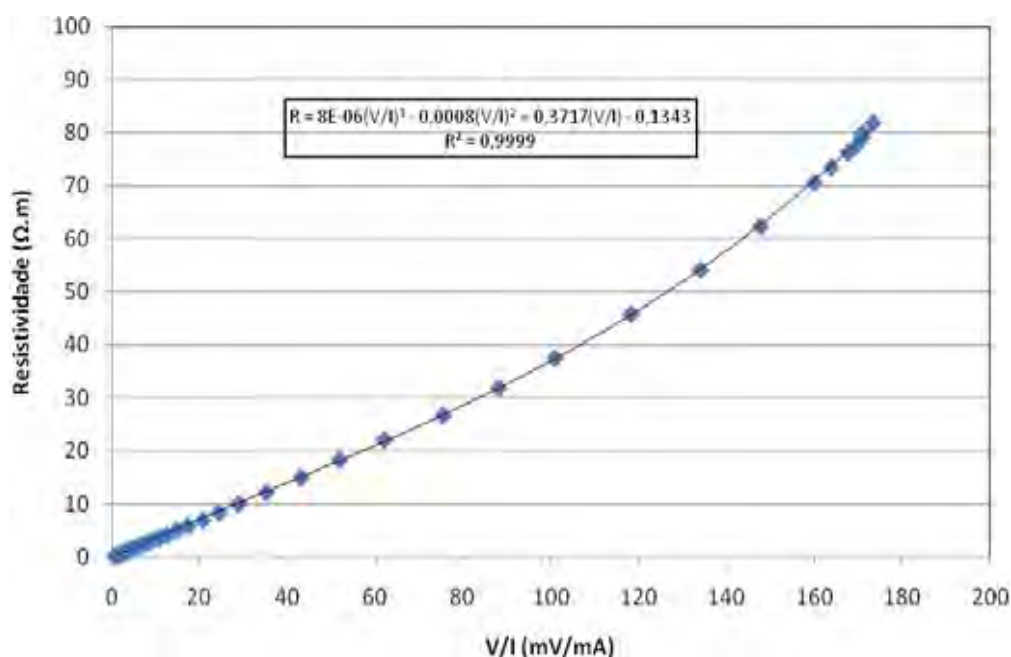


Figura 3. 15 - Calibração do mini-sensor (YAMASAKI, 2009)

$$\rho = 0,000008 \left(\frac{V}{I}\right)^3 - 0,0008 \left(\frac{V}{I}\right)^2 + 0,3717 \left(\frac{V}{I}\right) - 0,1343 \quad (6)$$

É importante ressaltar que a curva de calibração total do equipamento teve uma variação de V/I entre 0 e 1000, conforme **Figura 3. 16**, sendo apresentada mais recentemente por Bolliini e Peixoto (2011). Porém Yamasaki (2009) utilizou na equação 11 apenas para os dados contidos no intervalo de resistividade elétrica objeto de seu estudo.

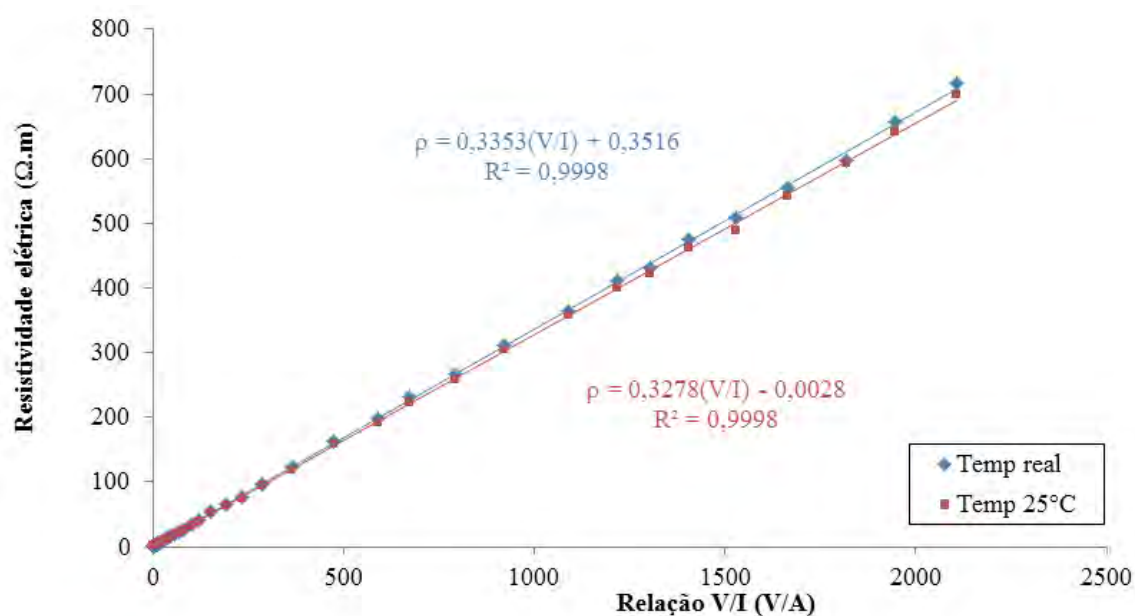


Figura 3. 16 – Curva de total de calibração. (Bollini e Peixoto, 2011, modificado)

Com a finalidade de comparar os valores calculados de resistividade com o mini-sensor (**Figura 3. 13**), Yamasaki *et al.* (2010) realizaram inicialmente ensaios utilizando duas placas circulares de cobre posicionadas cada qual em uma extremidade do mesmo corpo de prova compactado em 5 teores de umidade diferentes. Dessa forma, os ensaios realizados com as placas permitiram a obtenção da resistividade baseada na Teoria de Ohm, e também a avaliação da frequência mais adequada para os ensaios, ou seja, 1000Hz conforme já descrito na literatura.

A montagem do ensaio com as placas de cobre pode ser observada pela **Figura 3. 17** e o sistema do ensaio com o dispositivo de resistividade elétrica com configuração semelhante a do piezocone de resistividade pode ser observada pela **Figura 3. 18**.

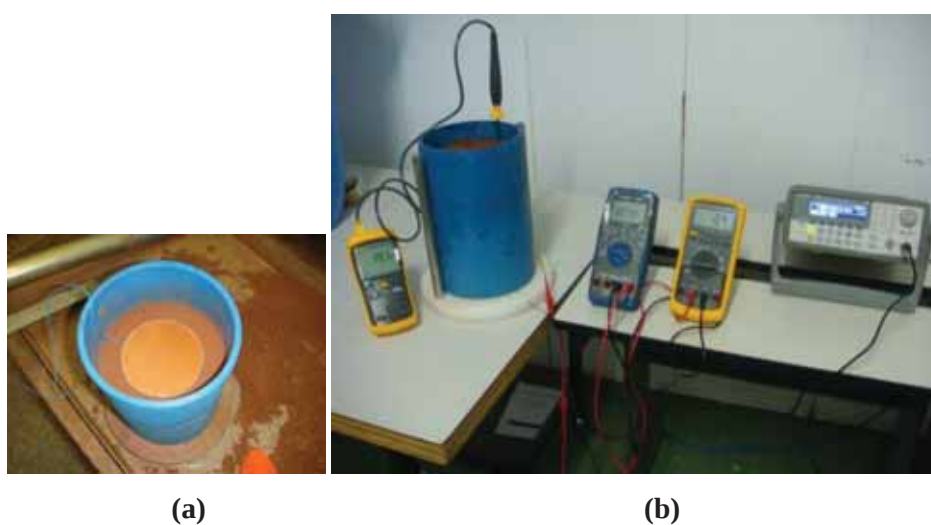


Figura 3. 17 - Configuração do Ensaio com as Placas de Cobre (YAMASAKI *et al*, 2010)

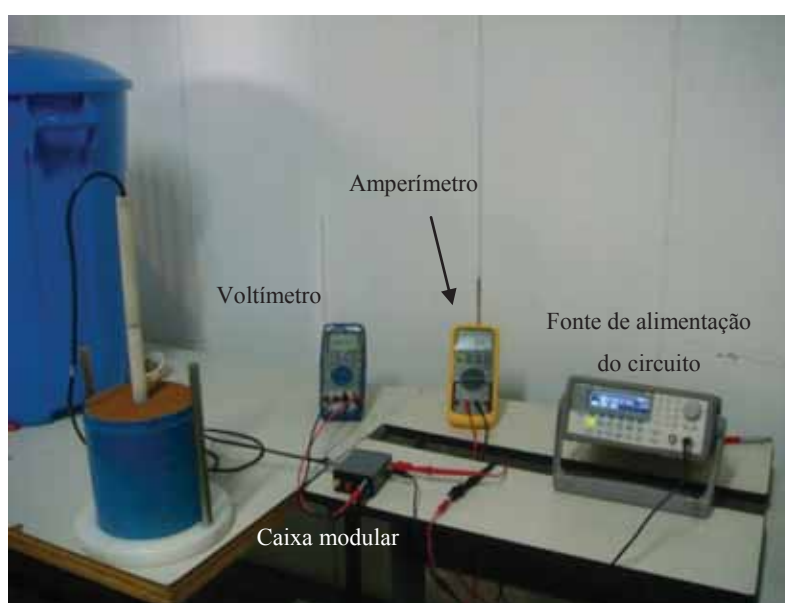


Figura 3. 18 - Configuração do ensaio de resistividade com o mini-sensor (YAMASAKI, 2009)

Por meio desse estudo Yamasaki et al. (2010) concluíram que, de uma maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios no ramo quasi-saturado apresentaram o mesmo comportamento esperado e encontrado na literatura. No entanto, foram observadas diferenças nos resultados obtidos através dos dois equipamentos no ramo seco da curva de compactação. Destacando-se que em ensaios realizados no campo com o RCPTU foram observadas as mesmas dificuldades encontradas na camada não saturada.

Aquino (2010) avaliou a resistividade elétrica de uma areia argilosa compactada, comparando a relação existente entre a resistividade elétrica de um solo característico do Distrito Federal frente às variações de suas características físicas.

Nesse estudo, foram compactados 20 corpos de prova cilíndricos de 6" de diâmetro (volume de aproximadamente 2085 cm³ - diâmetro de 152 mm e altura de 114 mm), visando a obtenção da resistividade elétrica do solo em diferentes condições de compactação. Destacando-se que a água adicionada nas amostras para compactação dos corpos de prova foi a água de abastecimento urbano.

Dessa maneira, o referido autor pode efetuar as medidas da resistividade elétrica dos corpos de prova ao passar uma corrente elétrica que flui através de um sólido quando a ele é imposta uma diferença de potencial (ddp). A **Figura 3. 19** representa a configuração de montagem dos equipamentos utilizados. Assim como Boszczowski (2008) e Yamasaki *et al.* (2010), o valor da resistividade elétrica foi calculada por meio das equações 02 e 03.

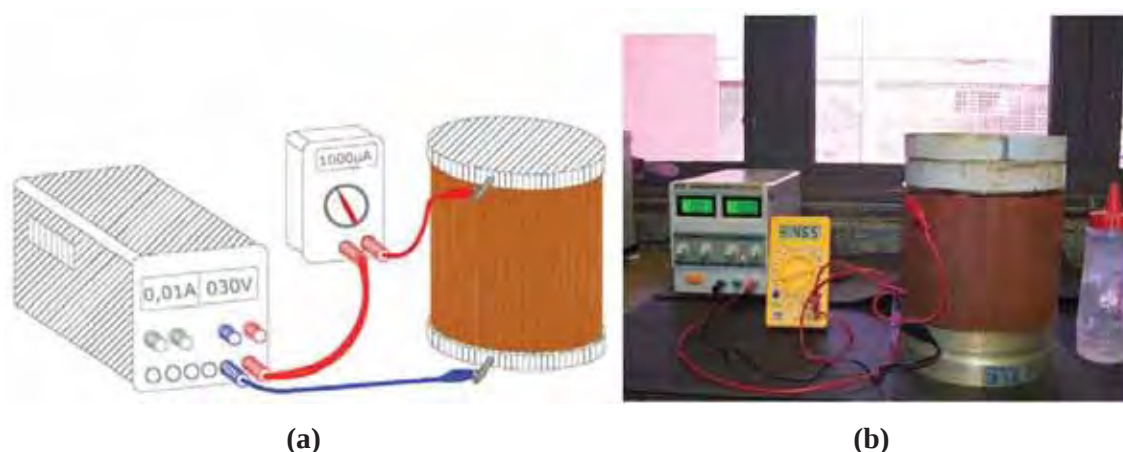


Figura 3. 19 - Sistema para medidas da resistividade elétrica: **(a)** desenho esquemático da montagem e **(b)** imagem da realização das medidas. (AQUINO, 2010)

No entanto, devido a possíveis irregularidades presentes nas faces dos corpos de prova Aquino (2010) utilizou entre os capacetes metálicos e as faces dos corpos de prova uma camada de aproximadamente 2 mm de espessura de um gel de alta condutividade elétrica, conforme **Figura 3. 20**.

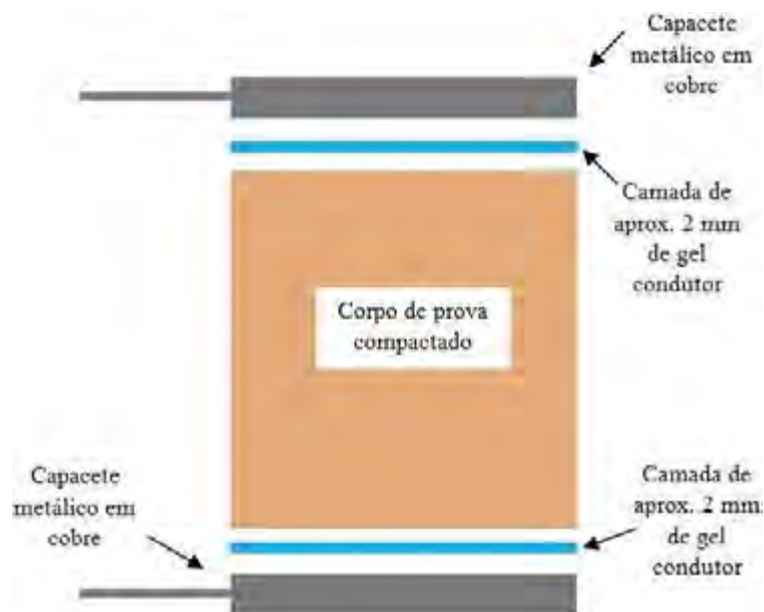


Figura 3. 20 - Desenho esquemático da preparação do corpo de prova para a medida de resistividade elétrica (AQUINO, 2010)

De modo geral, o autor verificou que as relações entre resistividade elétrica e os teores de umidade gravimétrica e volumétrica são boas e sua utilização se mostra, em um primeiro momento, como boa alternativa em um processo de controle de compactação, destacando-se, porém, a necessidade de se avaliar melhor a sensibilidade do método.

3.3 Interpretação dos resultados

Para a interpretação dos resultados, o solo é considerado um material trifásico constituído por sólidos, líquido e ar. A resistividade medida é função de todas as fases, mas o ar é sempre considerado um corpo isolante. A princípio a maior parte da corrente elétrica é conduzida pelo fluido intersticial, pois é nesse meio que ocorre mais facilmente o transporte de cargas, gerando a corrente eletrolítica. (CAMPANELLA *et al.*, 1998, e LUNNE *et al.*, 1997)

O tipo de líquido é, portanto, uma variável extremamente importante para a interpretação de resultados medidos. Como o tipo de solo tem grande relevância, é importante que o perfil de solo também seja conhecido. Essa prospecção pode ser realizada diretamente por uma sondagem, com recolhimento de amostras, ou indiretamente interpretando dados do piezocone.

Assim para o solo, a sua resistividade é influenciada por alguns fatores, podendo-se ser descrito por uma expressão empírica denominada de fórmula de Archie.

3.3.1 Fórmula de Archie

O solo é definido como pior condutor elétrico quando comparado com as soluções aquosas internas aos seus poros. Logo, o comportamento elétrico deste material é condicionado pela fase líquida.

A lei de Archie desenvolvida em 1942 relaciona a resistividade do fluido intersticial (ρ), a porosidade do solo (n) e o grau de saturação (S), conforme equações 12 e 13.

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \cdot S_r^{-b} \quad \text{para solos não-saturados} \quad (12)$$

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \quad \text{para solos saturados} \quad (13)$$

Sendo: ρ_b = resistividade do solo;

ρ_w = resistividade do fluido;

n = porosidade do solo;

S_r = grau de saturação;

a = fator escala da equação, que depende da mineralogia do solo. Para solos normalmente adensados, adota-se $a = 1$ e segundo Miranda *et al* (1997) varia de 0,5 a 2,5;

b = expoente que depende do tipo de solo, que Archie estimou como sendo igual a 2,0 e Dunlap *et al.* (1949) sugeriu que valores de 1,0 a 2,5 são mais apropriadas (*apud* DANIEL, 1997), e para Miranda *et al* (1997) é próximo de 2,0 para o caso em que mais de 30% dos poros se encontrem preenchidos;

m = factor de cimentação (adimensional), constante para dada rocha e independente do fluido. “ m ” caracteriza a distância percorrida pela corrente elétrica que equivale ao que se costuma designar por “tortuosidade”, que depende da forma dos poros e das interconexões entre eles, variando geralmente entre 1.3 e 2.2. (ROCHA *et. al.*, 2003) Para areias $m \cong 1,5$ e, para uma série de argilas $m = 1,8$ a 3,0 (JACKSON *et al.*, 1978)

No entanto, Miranda *et al.* (1997) atribuem o valor de m ao grau de compactação da rocha, variando entre 1,3 para as formações recentes, 1,9 para formações do Paleozóico, com o máximo de 2,5.

As propriedades relacionadas na fórmula de Archie são:

Tipo de Solo

O tipo de solo tem influência sobre a resistividade medida, principalmente, devido à forma dos grãos. (PACHECO, 2004)

Em solos arenosos e pedregulhos, a condutividade elétrica ocorre quase que exclusivamente no líquido contido nos poros do solo, pois o quartzo é um material não condutivo e a resistividade da matriz sólida é considerada infinitamente maior. Entretanto, em solos argilosos a condutividade elétrica ocorre nos poros e na superfície eletricamente carregada dos argilominerais. Para as argilas, a condutividade superficial pode afetar significativamente a resistividade elétrica do solo.

Particularmente, nos solos argilosos, a resistividade é influenciada pela sua estrutura, pelo teor iônico e pela espessura da película de água presa à superfície da argila (DAS, 1994).

Segundo Campanella e Weemees (1989) e Abu-Hassanein *et al.* (1996), o aumento da porcentagem de finos nos solos arenosos afeta a resistividade elétrica de três maneiras:

- reduzindo a porosidade, pois os finos ocupam os vazios entre os grãos, provocando, assim, um aumento da resistividade;
- contendo argilominerais condutivos, resultando num decréscimo de resistividade;
- apresentando elevada superfície específica que induz em condutância superficial, resultando num decréscimo da resistividade.

Nesse contexto, Nascimento *et al* (2004) realizaram uma campanha de ensaios em campo com o objetivo de reconhecer o solo por meio da medição da resistividade elétrica e radiação gama, em uma área que faz parte do Jardim Botânico de Brasília. Os resultados apresentados na **Figura 3. 21** demonstraram que é possível distinguir solos arenosos (parte central da área) de argilosos (ao norte) com base nessas medidas geofísicas, e no caso da área de estudo observaram-se valores de resistividade aparente abaixo de 15000 Ohm.m para solos argilosos e entre 15000 e 30000 Ohm.m para solos arenosos. Assim, os autores observaram que a textura pode causar a variação na resistividade pelo conjunto dos comportamentos físicos e químicos do solo. Do ponto de vista físico, os solos argilosos tendem a reter mais água que os arenosos, e deste modo, têm a condução da eletricidade pelos íons em solução na água intersticial facilitada. Do ponto de vista químico e mineralógico, os solos de textura fina têm quantidades relativamente grandes de argilominerais e pequenas de quartzo, o inverso ocorrendo com os solos arenosos. Deste modo, tem-se que a condução elétrica derivada de íons metálicos adsorvidos tende a ser maior nos solos argilosos, contribuindo, portanto para a sua menor resistividade.

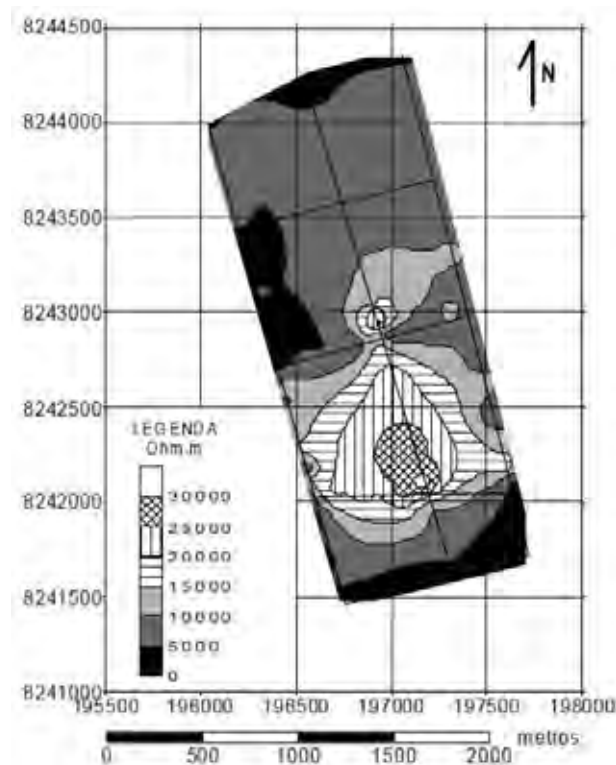


Figura 3. 21 - Mapa de resistividade aparente do JBB, obtido com arranjo de Wenner e espaçamento de 2 m entre eletrodos. Nascimento *et al* (2004)

Parâmetros do solo

Quanto maior o índice de vazios, maior é a área para passagem de corrente. Sob essa ótica é de se esperar que o mesmo material em diferentes índices de vazios tenha maior condutividade com o aumento do índice de vazios. (PACHECO, 2004).

No entanto, vale ressaltar que o índice de vazios (e) é um dos parâmetros do solo diretamente proporcional ao volume de vazios (V_v), expresso pela eq. 14.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (14)$$

Em que: V_v é o volume de vazios composto pela soma do volume de ar (V_{ar}) e do volume de água (V_a); e V_s é o volume de sólidos.

Lembrando que o ar possui comportamento semelhante a um material isolante e a água atua como agente condutor, mantendo-se constante o valor do índice de vazios, se espera que ocorra o aumento da condutividade com o aumento do volume de água.

Boszczowski (2008) estudou a relação entre o índice de vazios e a resistividade através de amostras deformadas em cinco solos pertencentes a um talude no município de Curitiba, PR, **Figura 3. 22.**



Figura 3.22 - Vista geral do talude e divisăo das camadas (BOSZCZOWSKI, 2008)

Através da **Figura 3.23** observa-se o aumento da resistividade com o aumento índice de vazios e que os solos mais intemperizados, marrom e vermelho, sofrem maior influência do índice de vazios do que os solos menos intemperizados.

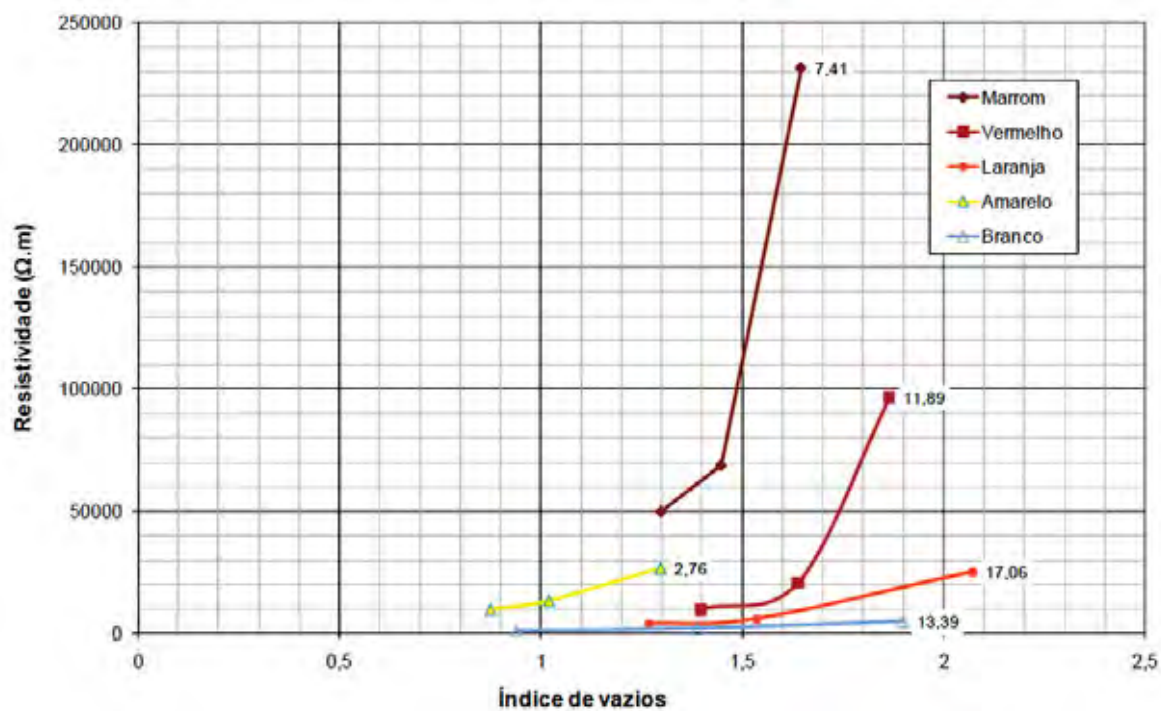


Figura 3.23 - Relação entre a Resistividade o Índice de vazios para amostras deformadas, mantendo-se o teor de umidade constante. (BOSZCZOWSKI, 2008)

Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é dependente de vários fatores como: a viscosidade do fluido; a distribuição dos poros; a granulometria; o índice de vazios; a rugosidade das partículas minerais e o grau de saturação do solo. Sendo que muitos dos quais influenciam, também, a resistividade elétrica. (DAS, 1994)

A presença de água torna-se importante na determinação da resistividade do solo, pois a sua atuação está em dissolver os compostos solúveis, levando a diminuição da resistividade por tornar maior a quantidade de íons dissolvidos no solo, ou seja, aumenta a condutividade do meio.

Boszczowski (2008) analisou o comportamento da resistividade frente à variação do teor de íons no fluido de percolação com cinco amostras moldadas em corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, pelo sistema montado na **Figura 3. 24** utilizando água destilada. Com os volumes pré-determinados, após cada percolação mediu-se a resistividade do solo e retirou-se a água presente na proveta graduada para análises químicas e de resistividade. Os resultados desses ensaios estão ilustrados graficamente na **Figura 3. 25**.



Figura 3. 24 - Percolação de água em corpos-de-prova do ensaio de resistividade elétrica. (apud BOSZCZOWSKI, 2008)

O elemento químico encontrado com maior incidência na água percolada foi o cloreto, seguido do cálcio. E o ânion mais presente foi o sulfato. Assim, na **Figura 3. 25** as curvas de resistividade elétrica do solo versus percolação da água estão apresentadas em conjunto com a variação de cloretos e ânions em relação a resistividade determinados para a água percolada.

Logo, se verificou que a cada volume de água destilada imposta ao sistema, o grau de saturação aumentou ao mesmo tempo em que os íons foram transportados para fora da amostra de solo pelo fluxo de água. Ou seja, dois parâmetros foram alterados durante o ensaio: a saturação dos corpos-de-prova e a quantidade de íons presentes no solo.

Nos seus estudos a autora ainda observou a influência da estrutura, visto que as curvas de resistividade das amostras deformadas e indeformadas apresentaram comportamento diferente, principalmente em umidades acima de 30%.

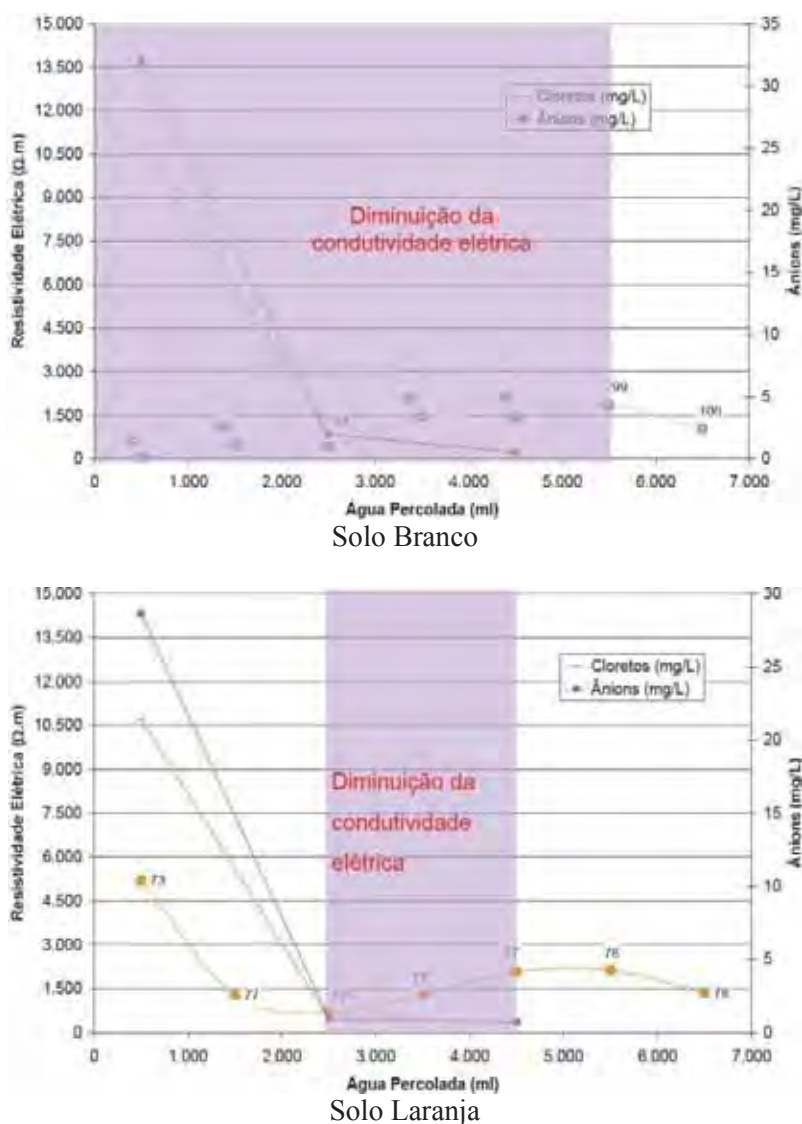


Figura 3. 25 - Variação da resistividade elétrica com a água percolada e quantidade de cloretos e ânions na água percolada para os diversos solos. Representação do grau de saturação nos rótulos dos pontos. (apud Boszczowski, 2008)

Teor de Íons no Fluido Intersticial

A quantidade de compostos iônicos dissolvidos no fluido intersticial determina a sua resistividade elétrica, pois como são eletricamente carregados sofrem atrações e repulsões entre si promovendo assim um deslocamento constante das partículas. De modo que, aumentando-se a concentração dos íons no líquido em estudo proporcionará o aumento da condutividade do meio, e simultaneamente um decréscimo na sua resistividade. Contudo, se o contaminante diluído apresentar característica isolante consequentemente o resultado será o oposto.

Nesse contexto, Weemes (1990) observou que a relação entre as medidas de resistividade em diferentes concentrações pode ser aproximada para segmentos de reta pela equação 15.

$$c = \sigma \cdot K_i \quad (15)$$

Em que: c = concentração de sólidos dissolvidos (mg/l); σ = condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$); e K_i = fator de condutividade, uma constante que depende da faixa de concentração eletrolítica no fluido intersticial.

A taxa de variação da condutividade para concentrações mais elevadas não é tão expressiva como é para concentrações menores, pois passa a haver choque entre os íons, o que leva à redução da mobilidade. Portanto, para concentrações mais elevadas K_i tende a diminuir. Além de variar a relação com a concentração, diferentes íons têm diferentes fatores de condutividade (K_i). Por esse motivo, um contaminante composto por diferentes íons terá um fator de condutividade igual à média ponderada entre os diversos elementos que o constituem (WEEMES, 1990). Dessa maneira a concentração do fluido intersticial pode ser estimada se a quantidade relativa entre os constituintes não estiver sendo alterada. (AQUINO, 2010).

Com esses conceitos, Aquino (2010) decidiu realizar um breve estudo sobre a condutividade elétrica da água que iria utilizar em seus ensaios, comparando-a com águas em diferentes salinidades. Na **Figura 3. 26** é apresentada a relação entre a condutividade elétrica das águas estudadas e suas respectivas salinidades, verificando-se a existência de uma relação linear entre elas. No entanto, nesse estudo foi utilizada uma fina camada de gel condutor, o que segundo Kishimoto (2011) possivelmente pode estar afetando nas medidas de condutividade.

Na sequência, o autor apresentou a variação da resistividade elétrica dos corpos de prova frente à variação da salinidade da água utilizada, juntamente com a variação da resistividade elétrica da água frente a variação de sua salinidade, **Figura 3. 27**. Nessa figura as curvas demonstram uma tendência de saturação do valor da salinidade, ou seja, para altos valores de salinidade a taxa de diminuição da resistividade elétrica tende a diminuir ou até mesmo estabilizar.

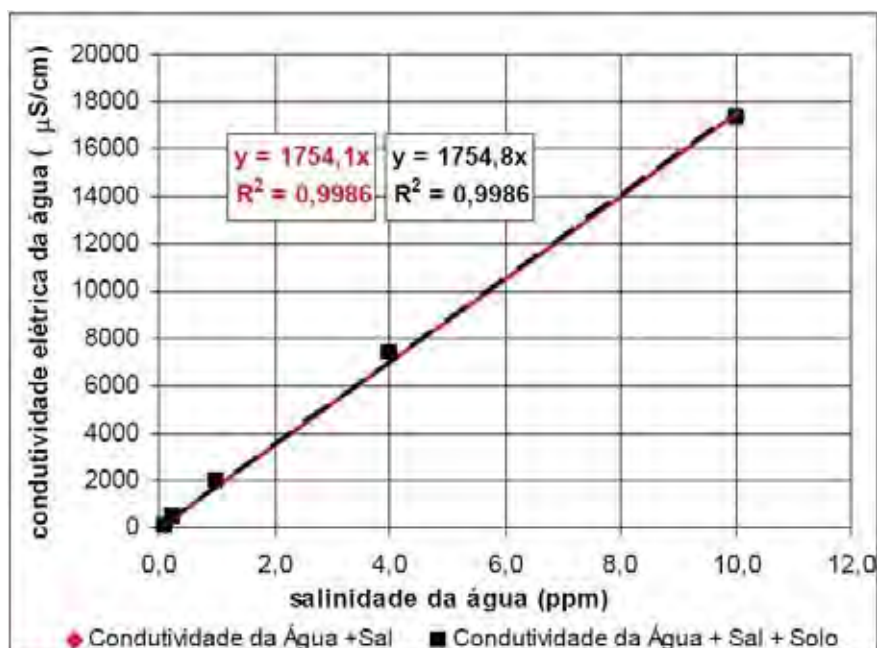


Figura 3. 26 - Relação entre a condutividade elétrica e salinidade para as águas estudadas com a utilização de um gel no contato entre o solo e as placas. (*apud* Aquino, 2010)

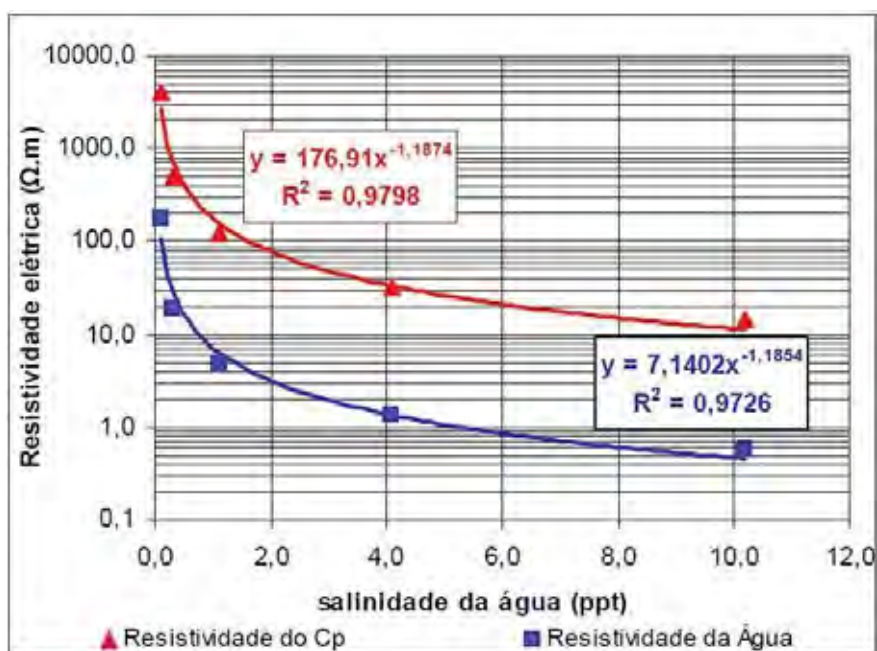


Figura 3. 27 - Comparação entre a variação da resistividade elétrica do corpo de prova e da água frente a variação da salinidade da água. (*apud* Aquino, 2010)

Temperatura

A resistividade das soluções intersticiais varia com a temperatura: para temperaturas mais elevadas é maior a energia cinética média dos componentes iônicos, o que aumenta a capacidade de condução iônica. (MIRANDA *et al.*, 1997)

Uma expressão empírica que descreve esta variação é:

$$\rho(T) = \frac{\rho(18^\circ)}{1 + \alpha(T - 18^\circ)} \quad (16)$$

No qual: $\rho(18^\circ)$ representa a resistividade a 18° Celsius; α é um coeficiente experimental cujo valor típico é de 0.025°C^{-1} e T é a temperatura em $^\circ\text{C}$.

Segundo Abu-Hassanein *et al.* (1996), ocorre uma redução da resistividade elétrica com o aumento da temperatura.

A temperatura do fluido intersticial afeta consideravelmente a viscosidade do mesmo e consequentemente sua condutividade, pois a viscosidade afeta a condutividade dos íons na solução eletrolítica.

Um importante estudo foi realizado por Kishimoto (2011) para verificar a influência da temperatura numa faixa de 10°C a 30°C na resistividade elétrica de um fluido em diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl): 1 ppm, 20 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm e 1000 ppm. Esses resultados estão apresentados na **Figura 3. 28**, e para cada concentração salina analisou-se a melhor equação que satisfaz a relação da curva. Embora a equação logarítmica em todas as curvas apresente melhor coeficiente de determinação (R^2), a autora sugere que utilize a equação linear, visto que, esta além de possuir R^2 maior que 0,95 é um meio mais prático.

A autora ainda verificou que para concentrações altas a variação da temperatura influencia cada vez menos, pois a concentração de íons presente produzida pelo cloreto de sódio adicionado predomina sobre o efeito causado pela variação da temperatura, vide **Tabela 3. 1**.

Tabela 3. 1 - Solução salina e sua respectiva faixa de variação da resistividade elétrica com a temperatura de 10°C a 30°C . (KISHIMOTO, 2011)

Concentração (ppm)	Resistividade elétrica a 10°C ρ_{10} (ohm.m)	Resistividade elétrica a 30°C ρ_{30} (ohm.m)	Variação da resistividade elétrica $\Delta\rho$ (ohm.m)
1	3540	2300	1240
20	270	178	92
50	100	62	38
100	47	29	18
200	28	19	9
500	12	7	5
1000	6	4	2
10.000	0,65	0,40	0,25

Os valores apresentados na **Tabela 3. 1** são bem diferentes em termos de ohm.m, porém, em porcentagem, esse aumento é cerca de 45% para a concentração de 1 ppm e de 38% para as concentrações de 20, 50, 100, 200, 500, 1000 e 10000 ppm.

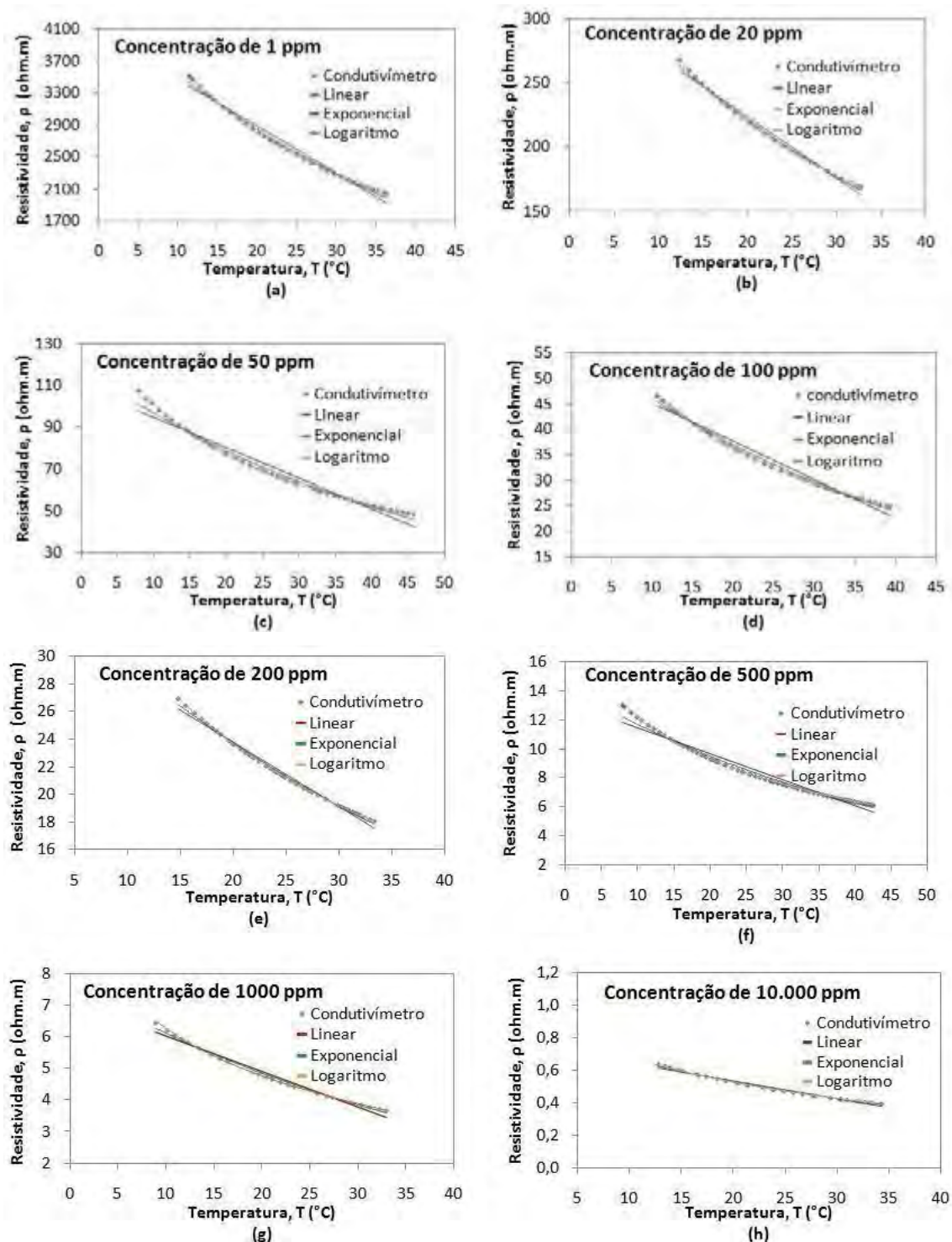


Figura 3. 28 - Gráficos de resistividade elétrica versus temperatura com o condutivímetero para concentrações de (a) 1 ppm, (b) 20 ppm, (c) 50 ppm, (d) 100 ppm, (e) 200 ppm, (f) 500 ppm, (g) 1000 ppm e (h) 10.000 ppm. (KISHIMOTO, 2011)

Teor de Umidade

Solos com baixo teor de umidade apresentam resistência elétrica muito alta. Alguns minerais presentes aparecem como isolantes, apesar de que em alguns solos pode existir uma pequena corrente sendo conduzida através da superfície das partículas. Portanto, o valor obtido para a condutividade elétrica de um solo é principalmente devido ao seu teor de água e de sais dissolvidos. (FREELAND (1989), *apud* PINCELLI (2004))

Sendo assim, o teor de umidade pode ser analisado de duas formas: gravimétrica e volumétrica.

- *Teor de Umidade Gravimétrica*

Oh *et al.* (2008) verificou em seus experimentos realizados de acordo com o esquema da **Figura 3. 12** que a resistividade é muito alta (condutividade baixa) no solo seco e decresce rapidamente com o aumento do teor de água até alcançar uma umidade a partir da qual ela se torna constante, **Figura 3. 29**.

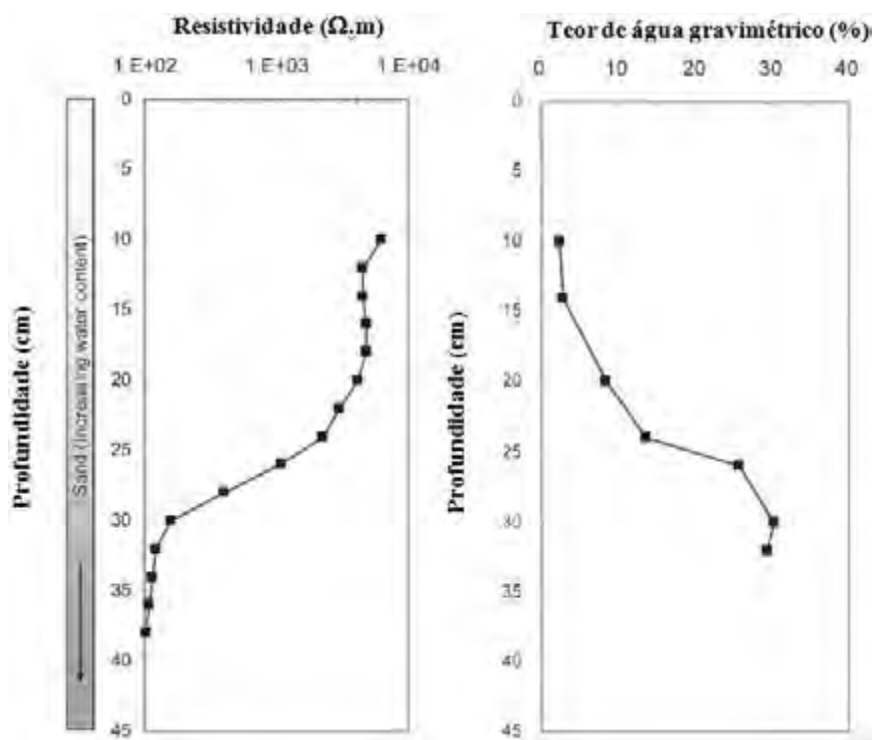


Figura 3. 29 - Relação entre a Resistividade Elétrica e Teor de Umidade *apud* OH *et al.* (2008)

Nas **Figura 3. 30** e **Figura 3. 31** observa-se que essa tendência também foi verificada por Boszczowski (2008). Esse decréscimo está relacionado com a condutividade do material, que é função do teor de umidade, fator diretamente relacionado com a solubilidade dos sais existentes.

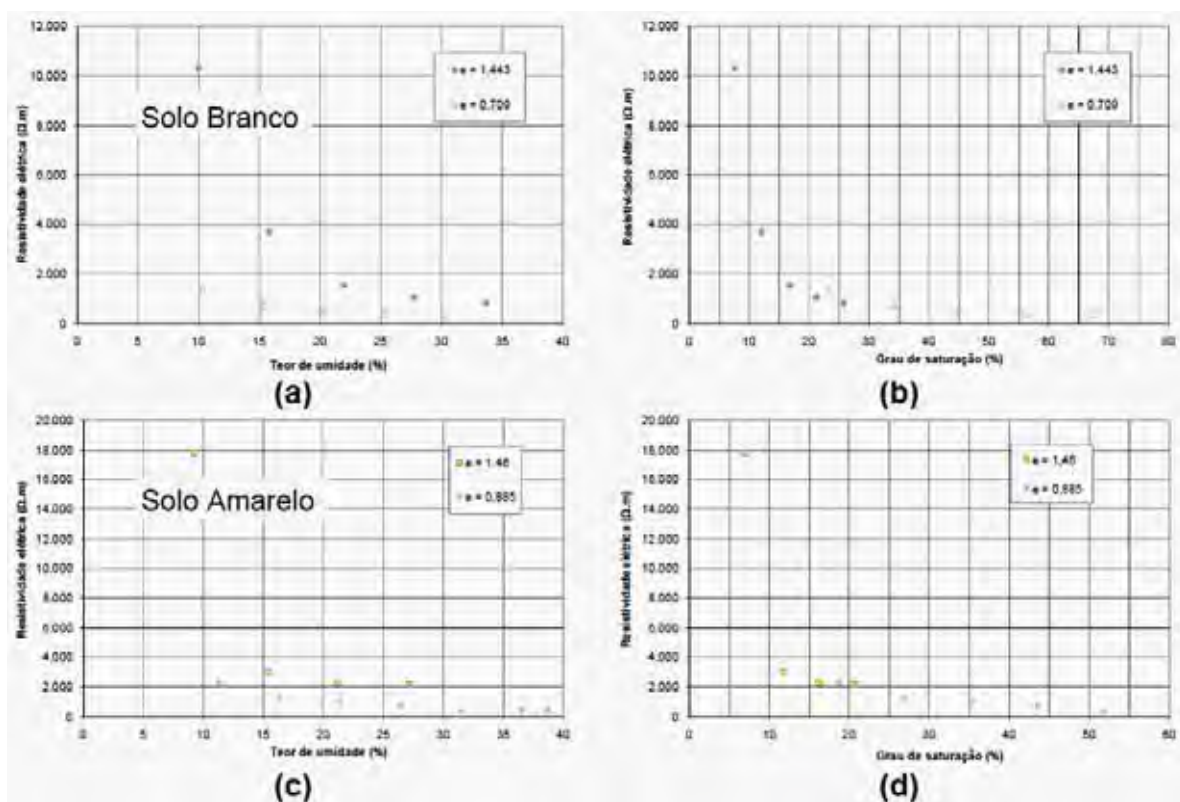


Figura 3. 30 - Variação da resistividade com o teor de umidade e grau de saturação para os Solos Branco e Amarelo, deformados (BOSZCZOWSKI, 2008)

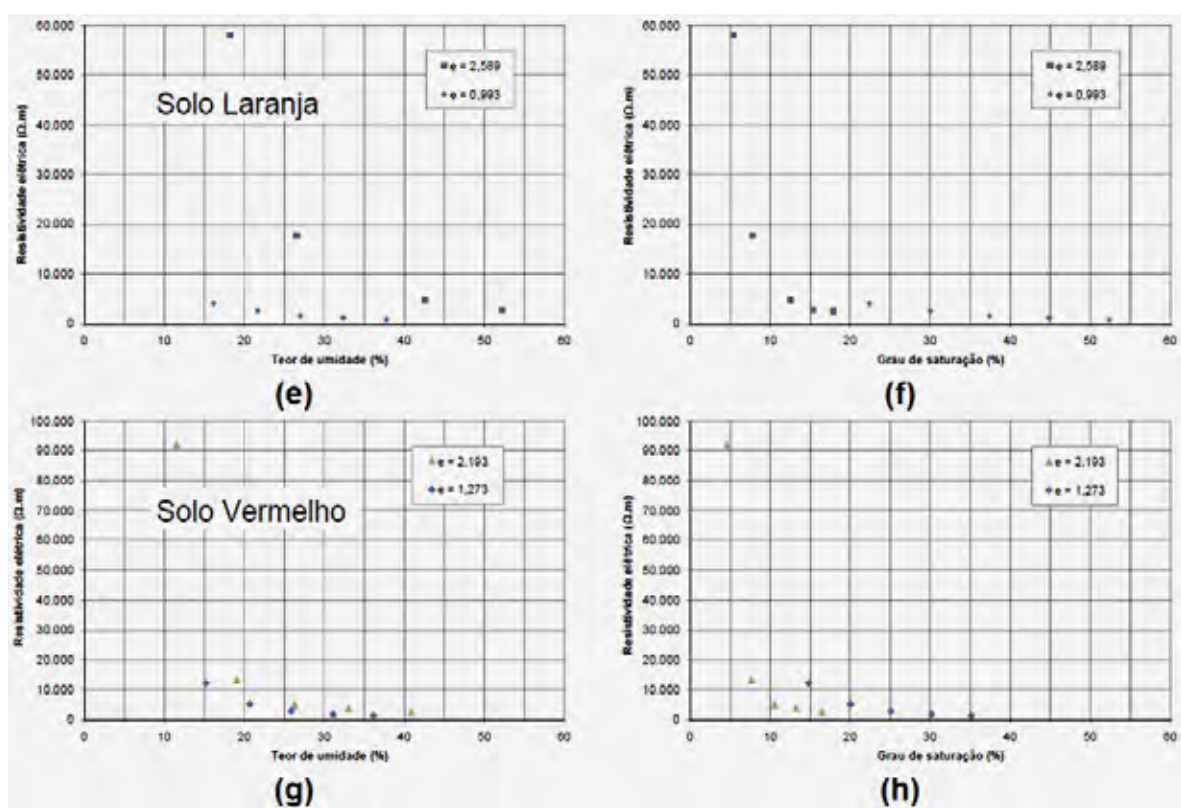


Figura 3. 31 - Variação da resistividade com o teor de umidade e grau de saturação para os Solos Laranja e Vermelho, deformados (BOSZCZOWSKI, 2008)

Em outro trabalho em que resistividades elétricas obtidas através de uma sondagem elétrica vertical utilizando a configuração Wenner, em um perfil de solo argiloso, associadas a coleta de amostras com realização de ensaios de caracterização resultaram em relações lineares para Hassona *et al.* (2008), **Figura 3. 32**. A metodologia de obtenção dessas amostras e a maneira com que foi obtida a variação do teor de umidade não foram bem especificadas no referido artigo. Mesmo assim, tais resultados precisam ser analisados mais detalhadamente.

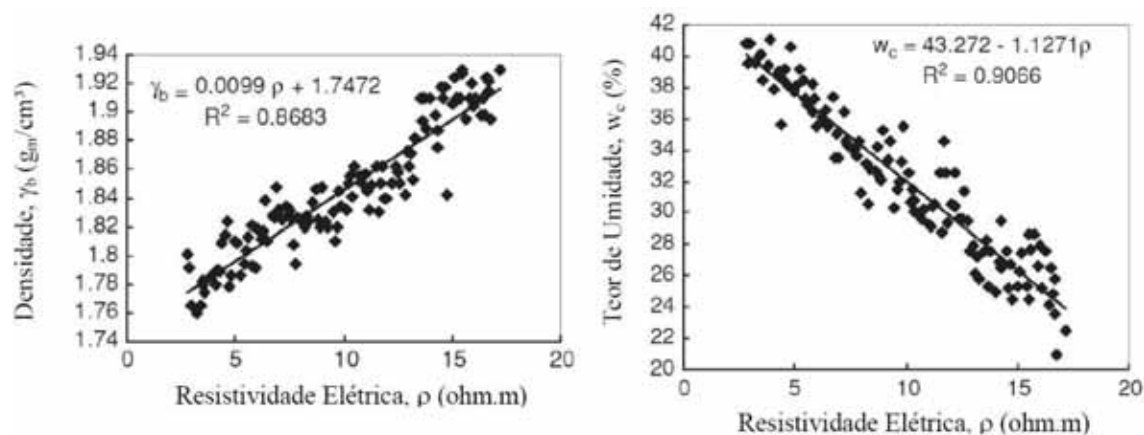


Figura 3. 32 - Relação Linear entre Massa específica do Solo, o Teor de Umidade e a Resistividade Elétrica *apud* HASSONA *et al.* (2008)

- *Teor de Umidade Volumétrica*

Análises realizadas por Aquino (2010) apontaram que entre todas as comparações realizadas, as que apresentaram a melhor relação com a resistividade elétrica foram em função do teor de umidade gravimétrica (w) e em função do teor de umidade volumétrica (θ_w), sendo essa última a que apresentou um coeficiente de determinação mais próximo de 1. Expresso na equação 17:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T} = \frac{V_v \cdot V_w}{V_t \cdot V_v} = n \cdot S_r \quad (17)$$

Em que: V_w é o volume de água; V_T é o volume total do corpo de prova; V_v é o volume de vazios; n é a porosidade; e S_r é o grau de saturação.

3.3.2 Análise da Lei de Archie

O objetivo de Daniel (1997) foi determinar as constantes a , b e m da Lei de Archie interpretando os dados de investigação. Assim, inicialmente para a estimativa do expoente da

porosidade (m) plotou-se um gráfico dilog do fator de formação (FF) versus a porosidade (n), o que gerou uma inclinação ($-m$) utilizando-se a equação 18.

$$\log(\text{FF} \cdot C) = -(m) \cdot \log(n) \quad (18)$$

Onde: FF é igual ao fator de formação (ρ_b / ρ_w); C é uma constante igual a S_r^b/a ; e n é a porosidade.

Determinado o valor de m , a equação 18 pode ser reorganizada para ler a equação 19 e, analogamente, obter o valor do expoente de saturação b pela inclinação da curva formada num gráfico dilog pelas parcelas de $(\text{FF} \cdot n^m)$ contra o grau de saturação (S_r).

$$\log((\text{FF} \cdot n^m)/a) = -(b) \cdot \log(S_r) \quad (19)$$

Para estimar o último parâmetro da Lei de Archie, Daniel (1997) traçou um gráfico do fator de formação (F) versus $n^{-m} \cdot S_r^{-b}$ com o propósito de chegar a uma relação linear com uma inclinação de (a). Os valores dos parâmetros obtidos pelo autor e outros dados estão contidos na **Tabela 3. 2**.

Com esse mesmo objetivo Mondelli (2008) estimou o parâmetro b da Lei de Archie, relacionando a resistividade elétrica do solo com a saturação de corpos-de-prova indeformados utilizando fluidos muito condutivos, conforme se pode verificar no gráfico da **Figura 3. 33**.

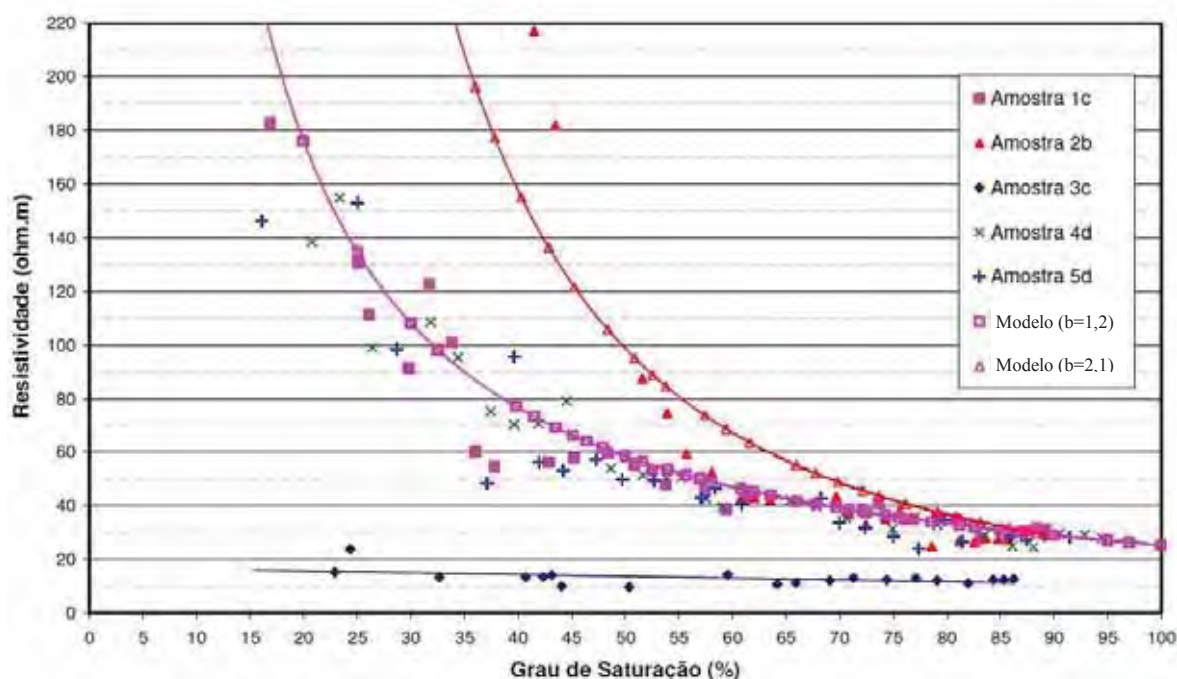


Figura 3. 33 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo ensaiadas com a solução salina a 1000ppm. (MONDELLI, 2008)

Tabela 3. 2 – Dados da resistividade em um corpo-de-prova compactado e os valores dos parâmetros encontrados por Daniel (1997, modificada)

Série	Amostra*	$\rho_w (\Omega.m)$	$\rho_b (\Omega.m)$	FF	n	Sr	m	b	a
1	Am	11	495	45	0,41	0,18	1,96	1,64	0,47
1	Bm	11	234	21	0,41	0,36	1,96	1,64	0,69
1	Cm	11	179	16	0,41	0,42	1,96	1,64	0,68
1	Dm	11	150	14	0,4	0,49	1,96	1,64	0,70
1	Em	11	116	11	0,4	0,52	1,96	1,64	0,60
1	Fm	11	87	8	0,39	0,64	1,96	1,64	0,60
1	Gm	11	55	5	0,38	0,83	1,96	1,64	0,55
1	Im	11	34	3	0,44	0,94	1,96	1,64	0,56
1	Jm	11	49	4	0,41	0,83	1,96	1,64	0,57
1	Km	11	50	5	0,42	0,82	1,96	1,64	0,60
1	Lm	11	41	4	0,43	0,83	1,96	1,64	0,53
2	As	11	583	53	0,47	0,13	1,96	1,67	0,40
2	Bs	11	397	36	0,47	0,18	1,96	1,67	0,47
2	Cs	11	239	22	0,47	0,25	1,96	1,67	0,49
2	Ds	11	194	18	0,46	0,28	1,96	1,67	0,46
2	Es	11	141	13	0,46	0,36	1,96	1,67	0,51
2	Fs	11	122	11	0,46	0,4	1,96	1,67	0,52
2	Gs	11	90	8	0,45	0,48	1,96	1,67	0,50
2	Hs	11	67	6	0,44	0,57	1,96	1,67	0,48
2	Is	11	66	6	0,44	0,6	1,96	1,67	0,51
2	Js	11	36	3	0,41	0,85	1,96	1,67	0,43
2	Ks	11	31	3	0,43	0,86	1,96	1,67	0,42
2	Ls	11	28	3	0,44	0,91	1,96	1,67	0,44
3	As	1,4	179	128	0,48	0,15	2,34	1,94	0,58
3	Am	1,4	154	110	0,41	0,19	2,34	1,94	0,54
3	Bs	1,4	82	59	0,47	0,25	2,34	1,94	0,68
3	Bm	1,4	73	52	0,41	0,31	2,34	1,94	0,67
3	Cs	1,4	19	14	0,45	0,57	2,34	1,94	0,70
3	Cm	1,4	16	11	0,39	0,71	2,34	1,94	0,65
3	Ds	1,4	12	9	0,43	0,74	2,34	1,94	0,66
3	Dm	1,4	10	7	0,40	0,81	2,34	1,94	0,56
3	Es	1,4	8	6	0,43	0,86	2,34	1,94	0,59
3	Em	1,4	9	6	0,42	0,81	2,34	1,94	0,58
3	Fs	1,4	7	5	0,44	0,90	2,34	1,94	0,60
3	Fm	1,4	8	6	0,44	0,83	2,34	1,94	0,58
4	As	8	307	38	0,48	0,20	2,08	1,75	0,50
4	Am	8	246	31	0,40	0,28	2,08	1,75	0,50
4	Bs	6,5	293	45	0,48	0,20	2,14	1,79	0,53
4	Bm	6,5	248	38	0,40	0,27	2,14	1,79	0,52
4	Cs	4,2	231	55	0,48	0,21	2,23	1,86	0,59
4	Cm	4,2	187	45	0,40	0,27	2,23	1,86	0,51
4	Ds	1,3	110	85	0,48	0,21	2,34	1,94	0,73
4	Dm	1,3	86	66	0,40	0,27	2,34	1,94	0,61

*em qualquer série, a primeira letra é a identificação da amostra, com teor de água diferente. A segunda letra indica se o teste foi realizado por Proctor normal (s) ou modificado (m)

Para a estimativa do parâmetro m da mesma lei, relativo à cimentação, a autora utilizou a proposta de Yoon *et al.* (2002), relacionando-se a resistividade medida com a umidade volumétrica (θ_w), conforme definida pela eq. 19. A umidade volumétrica pode ser substituída na Lei de Archie pelo fator $n.S_r$, quando o fluido de saturação possuir massa específica igual a 1g/cm^3 (ρ_w), conforme equação 20.

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_t} = \frac{M_w \cdot 1}{M_s \cdot V_t} = w \cdot \rho_d \quad (20)$$

Em que: V_w = volume de água no solo; V_t = volume total; M_w = massa de água no solo; M_s = massa de sólidos; V_w = volume de água no solo; ρ_d = massa específica seca; e w = teor de umidade.

Outra forma de interpretação da resistividade no solo é pelo fator de formação, razão entre a resistividade efetiva e a resistividade do fluido. Esta expressão só é válida na ausência de argilas. (MIRANDA *et al.*, 1997)

Assim obtidos os parâmetros m e b , Mondelli (2008) calculou o fator de formação (FF) e possibilitou estimar o parâmetro a pela relação apresentada na **Figura 3. 34**, que ficou em torno de 1. Os três parâmetros obtidos pela autora estão dispostos na **Tabela 3. 3**.

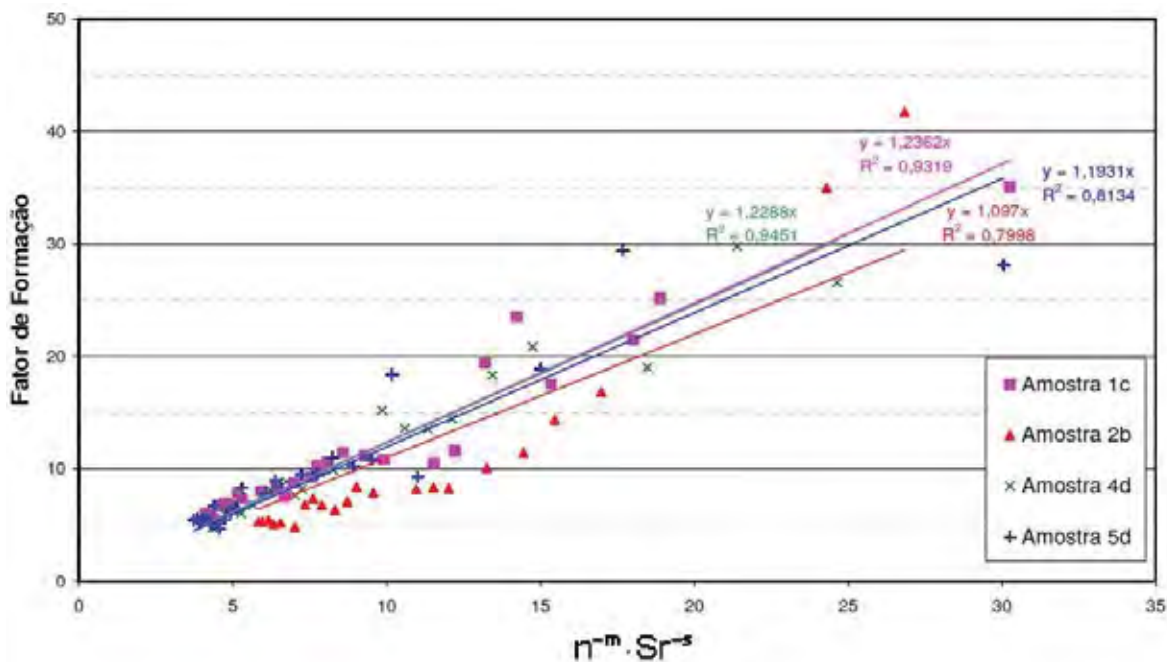


Figura 3. 34 – Estimativa do parâmetro “a” da Lei de Archie, utilizando-se solução salina a 1000ppm como fluido de percolação. (MONDELLI, 2008)

Tabela 3. 3 – Parâmetros de cimentação (m) e saturação (b) da Lei de Archie estimados por Mondelli (2008) para as amostras de solo estudadas em laboratório.

Fluido	NaCl 1000 ppm			Chorume		
Amostra	a	m	b	a	m	b
1	1,2	1,4	1,2	0,8	1,8	2,0
2	1,1	2,1	2,1	1,0	2,1	2,1
3	--	--	--	--	1,5	--
4	1,2	1,4	1,2	1,1	1,6	1,6
5	1,2	1,4	1,2	0,8	1,5	1,6

No entanto, Yamasaki *et al.* (2010) analisaram pela Lei de Archie, os dados obtidos em ensaios realizados com o mini-sensor de resistividade (**Figura 3. 13**), embora esta não tenha sido inicialmente formulada para solos contendo argila. Construiu-se um gráfico (**Figura 3. 35**) na tentativa de se obter o valor para o parâmetro *b* da eq. 21 e em resposta chegou-se a uma relação exponencial cujo coeficiente de determinação foi 0,8381.

$$\frac{\rho_b}{\rho_{bsat}} = S^{-b} \quad (21)$$

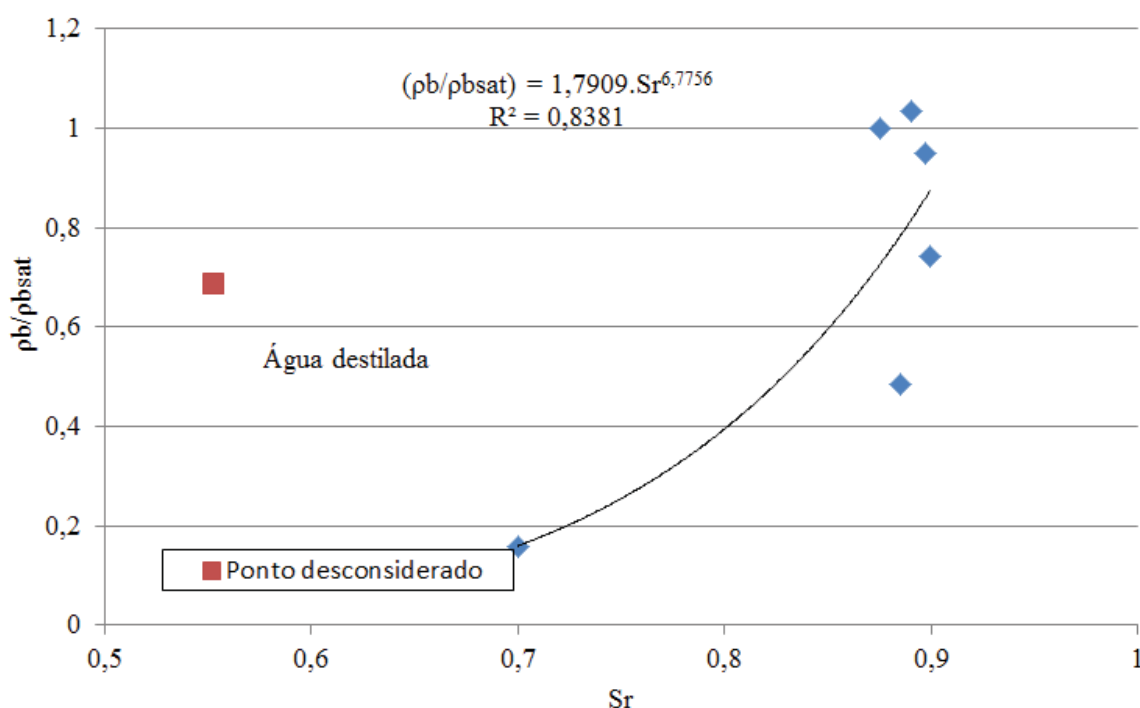


Figura 3. 35 - Grau de Saturação Versus Relação entre Resistividade Não Saturada e Resistividade Quasi-Saturada para Água Destilada (YAMASAKI *et al.*, 2010)

3.3.3 *Sucção Matricial*

Sabendo-se que os solos tropicais apresentam-se naturalmente nas condições saturados ou não saturados, o comportamento da sucção se demonstra interessante para a análise da resistividade elétrica, pois ambos estão diretamente ligados ao mesmo fator, a quantidade de água ou o grau de saturação.

A sucção é definida como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas que fazem com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais e aumentando ou reduzindo o grau de saturação. Ela é normalmente dividida em dois componentes: o componente matricial (dependente da estrutura e da composição do solo), definido como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios ($u_a - u_w$) e que tende a desaparecer com a saturação, e o componente osmótico (dependente da concentração química da água do solo). A sucção total é soma da sucção matricial e da sucção osmótica. (MIGUEL *et al.*, 2006)

Uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção de água no solo, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo. E para a determinação da sucção matricial em laboratório, o método do papel filtro é um dos métodos mais utilizados devido a simplicidade de materiais empregados.

Soto (2004) ainda relaciona algumas vantagens do método, tais como: o tempo de resposta do papel é relativamente curto para cada equilíbrio sendo da ordem de uma semana (tempo mínimo recomendado) quando medida a sucção matricial; torna possível a medição da sucção dos solos numa faixa de 0,1 a 150.000 kPa (NELSON e MILLER, 1992); oferece versatilidade, economia e uma precisão similar ou até melhor do que outros métodos convencionais (Mc QUEEN e MILLER, 1968); torna possível a medição da sucção osmótica indiretamente pela diferença das medidas da sucção total e matricial; e o procedimento do ensaio é simples. E entre as desvantagens o autor observa que: requer um manuseio delicado do papel e precisão na pesagem numa balança com resolução de 0,0001g; o tempo de resposta do papel é relativamente longo para cada equilíbrio sendo da ordem de 30 dias (tempo mínimo recomendado) para sucções de 0 a 100kPa quando medida a sucção total; e os resultados dependem de um bom contato entre o papel e o solo.

Nessa técnica, o papel filtro pode ser usado para determinar a sucção matricial através do fluxo capilar, com um contato direto através das partículas do solo e do papel filtro, sem que a água perca continuidade implicando interação entre o papel filtro e a água do poro. Ao ser medido através do fluxo de vapor sem contato direto com o solo, as forças osmóticas e capilares que retêm a molécula de água são incorporados e a medição feita é a sucção total. (SOTO, 2004)

Normalmente o papel filtro largamente utilizado é o Whatman N° 42. Sendo assim, o teor de umidade medido neste papel é convertido para sucção pelas equações contidas na **Tabela 3. 4**.

Tabela 3. 4 - Curva de calibração para o papel filtro Whatman 42 (BICALHO *et al.*, 2007)

Referência	Sucção	W (%)	Log ₁₀ (Sucção) (kPa)
ASTM D5298	Total e matricial	W<45,3	5,327-0,0779W
ASTM D5298	Total e matricial	W>45,3	2,412-0,0135W
Chandler e Gutierrez (1986)	Matricial	(*)	2,85-0,0622W
Chandler <i>et al.</i> (1992)	Matricial	W<47	4,842-0,0622W
Chandler <i>et al.</i> (1992)	Matricial	W>47	6,050-2,48 LogW
Oliveira e Marinho (2006)	Matricial e total	W<33	4,83-0,0839W
Oliveira e Marinho (2006)	Matricial e total	W>33	2,57-0,0154W
Observação: W = teor de umidade gravimétrica (*) variação da sucção (80 – 6000 kPa)			

Assim, Aquino (2010) realizou um estudo comparativo entre a sucção e a resistividade elétrica utilizando esse método e seguindo as trajetórias de secagem - quando a amostra previamente saturada é exposta para ser seca ao ar - e umedecimento - quando se adiciona quantidades determinadas de água a amostra seca ao ar - em uma areia argilosa compactada, conforme **Figura 3. 36**.



Figura 3. 36 - Preparação dos corpos de prova para ensaio de papel filtro: a) secagem ao ar, b) umedecimento por gotejamento. (AQUINO, 2010)

A sucção foi calculada pelas equações da **Tabela 3. 4** propostas por Chandler *et al.* (1992) e analisada em relação a resistividade elétrica. Como se pode observar na **Figura 3. 37(a)** a sobreposição das curvas características de retenção de água referentes à sucção matricial, em função do grau de saturação, com a curva da variação da resistividade elétrica com o grau de saturação do solo e **(b)** Relação direta da resistividade elétrica com a sucção matricial.

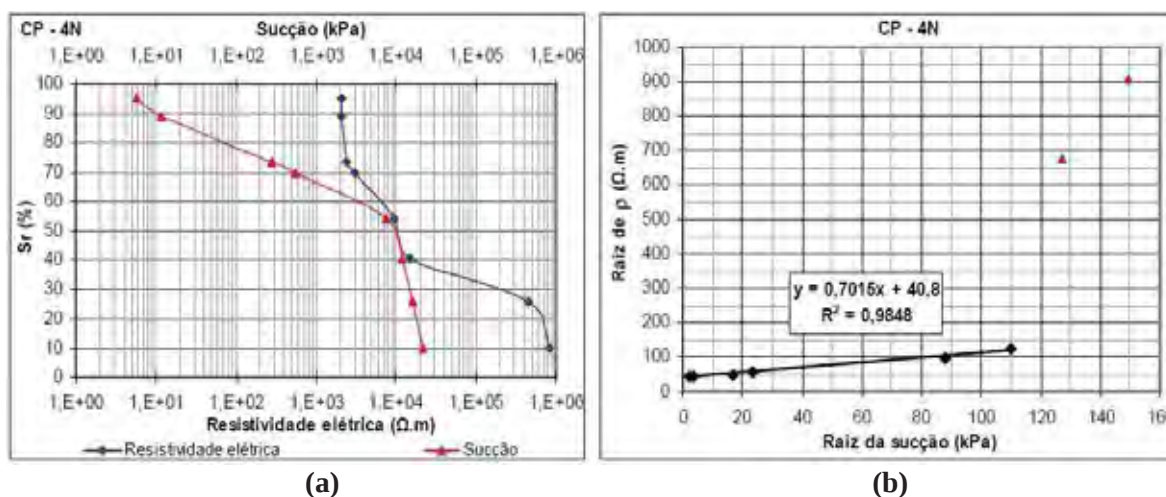


Figura 3. 37 – Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial para o corpo-de-prova 4N, referente ao ponto de umidade ótima para o Proctor normal. (AQUINO, 2010)

O autor realizou ensaios para outros pontos da curva de compactação em três energias e o comportamento das curvas foi, no geral, semelhante ao apresentado na **Figura 3. 37**. Por estes resultados verificou-se que antes do início da entrada de ar nos microporos, existem caminhos de águas conectados que são responsáveis pela existência da sucção matricial na amostra pelos efeitos capilares e facilitam a condução de corrente elétrica por meio da eletrólise. Aquino (2010) ainda comenta que ao entrar ar nos microporos do solo, a tendência da sucção é se manter constante ou aumentar em proporções menores com a diminuição da saturação, no entanto para a resistividade elétrica representa a perda da continuidade dos caminhos de água no solo promovendo o seu aumento brusco.

3.4 Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru e Aeroporto Estadual de Piracicaba “Pedro Morganti”

Estão apresentados alguns estudos já realizados com amostras coletadas dos mesmos locais escolhidos para essa dissertação, sendo o primeiro uma areia argilosa com origem do Aterro de Resíduos Sólidos da cidade de Bauru e o outro, uma argila arenosa proveniente do Aeroporto Estadual do município de Piracicaba “Pedro Morganti”, ambos localizados no interior do Estado de São Paulo.

Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru

Algumas pesquisas já foram realizadas com o solo desse local, destacando-se a tese de doutorado de Mondelli (2008) em que, com base nos resultados de ensaios geofísicos, sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT, ensaios de piezocone de resistividade (RCPTU) e amostras de água e solo coletados nos poços de monitoramento e de amostradores *direct-push*, mostra que, mais do que a superfície potenciométrica, os condicionantes hidrogeológicos da área são determinantes para uma locação mais adequada dos sistemas de monitoramento.

Na região onde está localizado o aterro, os sedimentos do Grupo Bauru, assim como os solos de alteração, residual, estão sobrepostos por camadas de aluvião e colúvio. Na **Figura 3. 38** está apresentada a localização dos poços de monitoramentos, assim como das sondagens SPT e dos ensaios de geofísica e de piezocone (CPTU e RCPTU) já realizados no aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru.



Figura 3. 38 - Localização dos ensaios realizados no aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru-SP *apud* MONDELLI *et al* (2006) modificado.

Para Mondelli *et al* (2006), a utilização de diferentes técnicas de investigação foi fundamental para a avaliação da pluma de contaminação, mostrando a importância da hidrogeologia sobre os fatores topográficos e potenciométricos da área. Deste modo, a locação e a interpretação dos sistemas de monitoramento, que também podem sofrer influência de atividades externas à fonte de contaminação em questão, podem ser feitas de maneira mais adequada.

Mondelli (2008) utilizou amostras indeformadas de areia pouco argilosa retirada do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru para os ensaios de laboratório. Cujos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica estão apresentados na **Tabela 3. 5**.

Foram coletadas 5 amostras em diferentes locais: 1 e 2, a um e dois metros do topo do talude ao norte da cava de resíduos e próximo ao poço PP-13; 4 e 5, a três e cinco metros e meio do topo do talude entre os poços PP-13 e PP-4; e amostra 3 um bloco de arenito. Com exceção da amostra 3, que é um arenito, as demais foram classificadas como areia fina argilosa marrom avermelhada, bastante a pouco argilosa, dependendo do grau de intemperismo sofrido.

Tabela 3. 5 - Classificação das amostras de solo estudadas em laboratório (MONDELLI, 2008)

N° da amostra		1	2	3	4	5
Granulometria Conjunta (NBR 502/95)	% Areia média	18,0	19,0	25,0	21,0	20,0
	% Areia fina	54,6	42,0	52,5	55,6	62,0
	% Silte	13,9	18,0	17,5	7,1	8,0
	% Argila	13,5	21,0	5,0	16,3	10,0
	% Finos	39,6	46,3	28,4	37,8	31,6
	% CaCO₃	-	-	5,0	-	-
Limites de Consistência	LL (%)	28,0	32,0	38,8	27,5	27,7
	LP (%)	16,0	22,2	30,5	19,6	20,4
	IP (%)	12,0	9,8	8,5	7,9	7,3
Classificação Unificada		Areia Argilosa SC	Areia Argilosa SC	Areia Siltosa SM	Areia Argilosa SC	Areia Argilosa SC
Classificação Granulométrica	Com defloculante	Areia fina silto-argilosa	Areia fina argilo-siltosa	Areia fina siltosa	Areia fina argilosa	Areia fina argilo-siltosa
	Sem defloculante	Areia fina siltosa	Areia fina muito siltosa	Areia fina siltosa	Areia fina siltosa	Areia fina siltosa
Índice de atividade (%)		0,89 normal	0,47 inativa	1,70 ativa	0,48 inativa	0,73 inativa

Para a realização das leituras de resistividade, Mondelli (2008) adotou a proposta de Daniel (1997), em que dois eletrodos de aço-inox, um em cada extremidade, e dois, no centro do corpo de prova, foram acoplados ao molde de transferência da corrente elétrica e medida a diferença de potencial imposta entre eles. Para obtenção dos dados, foi usado um eletrorresistivímetro de campo Syscal Pro mostrado na **Figura 3. 39(a)**. O arranjo entre os eletrodos adotado pela autora foi o Wenner, caracterizado por apresentar espaçamentos iguais entre os eletrodos, **Figura 3. 39(b)**.



Figura 3. 39 - (a) Eletrorresistivímetro Syscal Pro utilizado por MONDELLI (2008) para obtenção de valores de resistividade em laboratório e (b) Detalhe do corpo de prova instrumentado para medida da resistividade elétrica em laboratório (MONDELLI, 2008)

Pode-se observar pelos dados obtidos nos ensaios, **Figura 3. 40**, que as amostras mais argilosas (amostra 1 e 2) apresentaram valores de resistividade menores que aquelas menos argilosas (amostras 4 e 5), tendendo a permanecer constante com o grau de saturação. Fato ocorrido devido às partículas de argila conduzir eletricidade com a presença da dupla camada, o que não ocorre com os grãos de quartzo constituintes da areia. Já na amostra 3, os baixos valores de resistividade medidos para o arenito podem ser justificados pela presença de argilominerais ativos e pela elevada cimentação de carbonato de cálcio existente.

Mesmo para diferentes corpos de prova, a tendência de valores constantes ou mesmo crescentes da resistividade com a redução do grau de saturação foi confirmado para a amostra 2 e amostras 4 e 5, respectivamente.

Através dessa pesquisa, Mondelli (2008) pode concluir que a resistividade elétrica (ρ) varia com o grau de saturação (S_r), como se pode perceber na **Figura 3. 40** e na **Tabela 3. 6**. Segundo ela, a grande faixa de variação dos valores de resistividade é causada pela variação mineralógica e à evolução dos solos estudados. Solos mais evoluídos possuem maiores valores de resistividade. No caso dos solos tropicais, a quantidade e o tipo dos argilominerais devem influenciar nos valores de resistividade, em maior ou em menor grau, dependendo da atividade dos mesmos e/ou da resistividade do fluido intersticial.

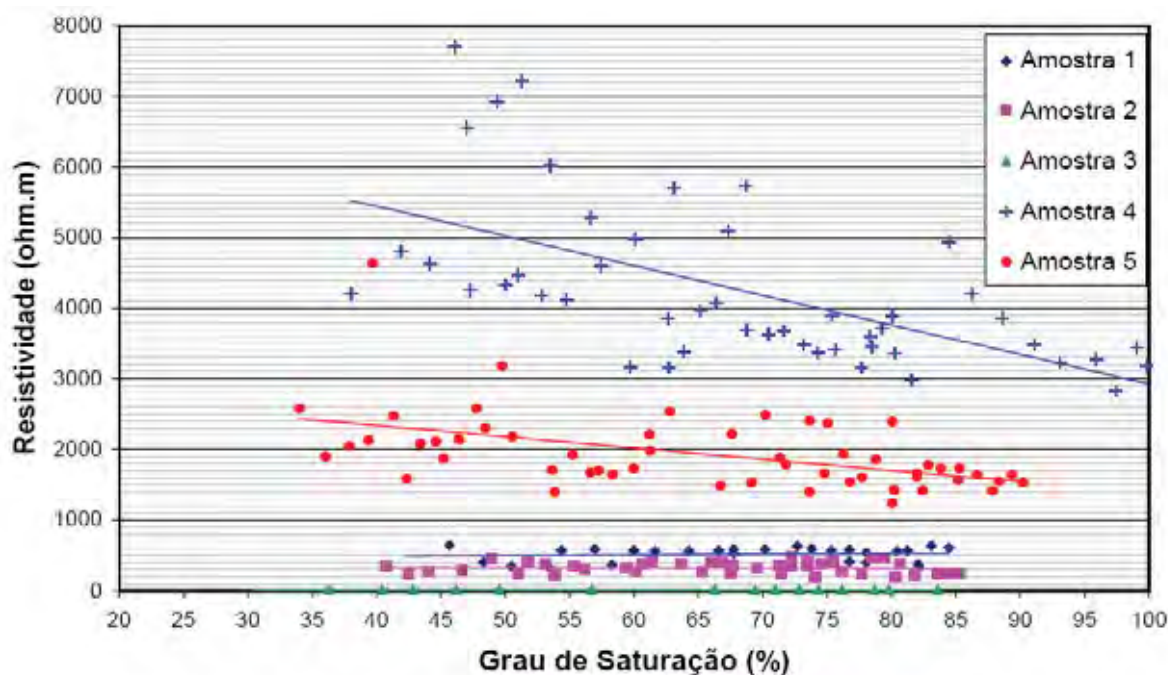


Figura 3. 40 - Resistividade em função do grau de saturação *apud* MONDELLI (2008)

Tabela 3. 6 - Faixa de variação dos valores de resistividade encontrados por Mondelli (2008) para as amostras de solo estudadas em laboratório.

Fluído	Amostra	1	2	3	4	5
	Gênese	Residual de arenito	Residual de arenito	Arenito Bauru	Residual de arenito	Residual de arenito
	Textura	Areia silto-argilosa	Areia argilo-siltosa	Areia siltosa	Areia argilosa	Areia argilo soltosa
Água destilada	R ($\Omega.m$)	331 a 643	197 a 483	12,8 a 17,6	2819 a 7926	1235 a 4635
	Sr (%)	45,7 a 84,4	40,8 a 85,3	36,0 a 83,6	38,0 a 99,8	34,0 a 90,2
Água de torneira	R ($\Omega.m$)	559 a 1019	190 a 510	-	2960 a 6589	1165 a 2230
	Sr (%)	34,6 a 80,2	32,2 a 82,7	-	41,8 a 97,1	29,5 a 88,2

Também foram realizados ensaios com água de abastecimento público ($CE=57\mu S/cm$ e $R=175,4\Omega.m$) e com solução de NaCl a 200ppm ($CE=385\mu S/cm$ e $R=26\Omega.m$) para observar a influência da quantidade e o tipo de argilominerais encontrados em solos tropicais, na medida da resistividade. Os resultados obtidos (**Figura 3. 41** **Figura 3. 42**) confirmaram o comportamento descrito para as curvas de resistividade obtidas para as amostras percoladas com água deionizada.

Verificou-se que os valores de resistividade e os graus de saturação (**Tabela 3. 6**) foram menores que aqueles obtidos com a percolação de água deionizada. Observa-se que essa diminuição é proporcional à condutividade elétrica do fluído, ou seja, quanto menor a resistividade

do fluido, menores são os valores de resistividade do solo e dos graus de saturação atingidos durante a secagem dos corpos de prova, devido ao melhor contato dos mesmos com os eletrodos.

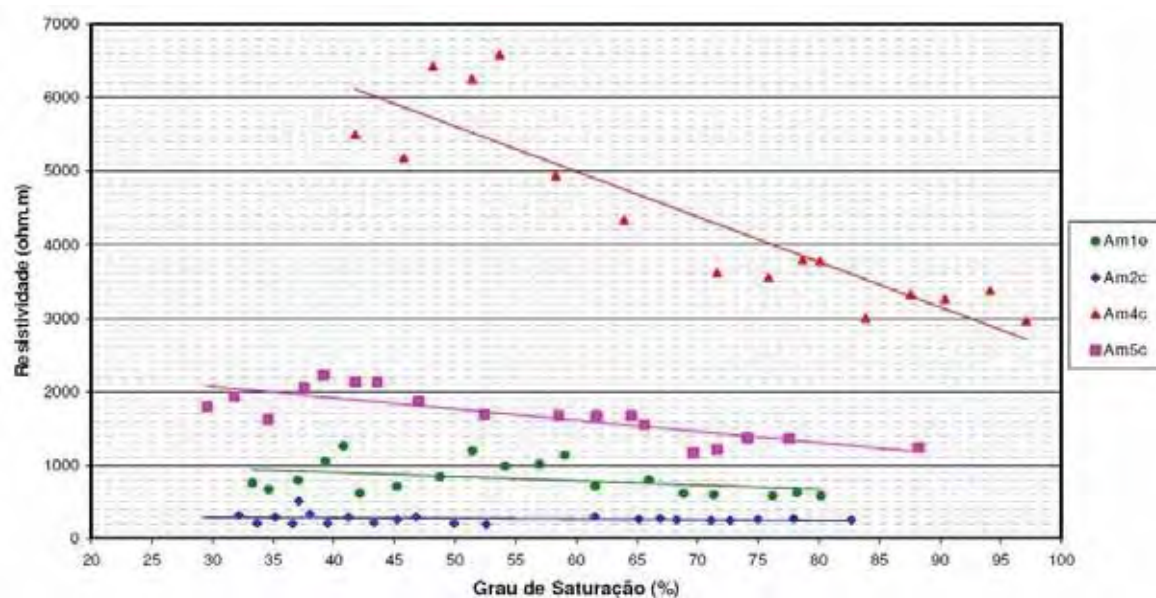


Figura 3. 41 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo percoladas com água de torneira *apud* MONDELLI (2008)

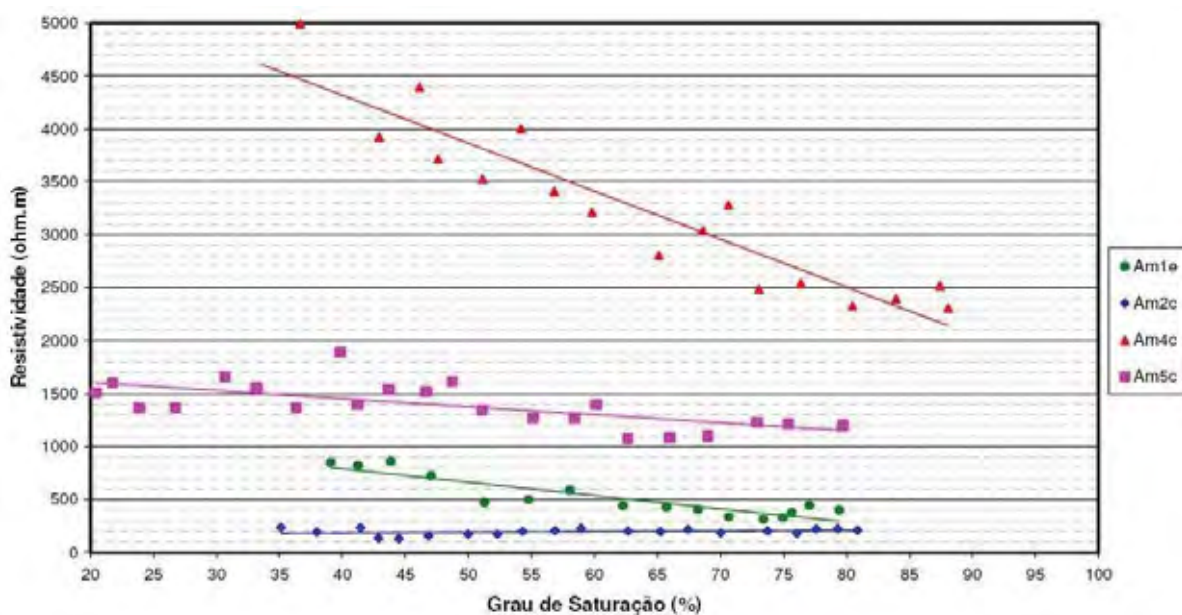


Figura 3. 42 - Resistividade elétrica em função do grau de saturação para as diversas amostras de solo percoladas com solução salina a 200ppm *apud* MONDELLI (2008)

Com os menores valores de resistividade contidos na **Tabela 3. 6** foram calculados e apresentados na **Tabela 3. 7** nos fatores de formação (FF) para as amostras percoladas com diferentes fluidos. Essa tabela mostrou que o fator de formação tende a aumentar com a diminuição

da resistividade do fluido e que valores de FF menores que 1 podem ocorrer em solos tropicais, onde a influência das partículas de argila nos valores de resistividade é maior que a influência do grau de saturação.

Tabela 3. 7 - Fatores de Formação (FF) obtidos por Mondelli (2008) para as amostras percoladas com diferentes fluidos.

Fluido	Am.	1		2		3		4		5	
	R _{fluido} (Ω.m)	R _{solsat} (Ω.m)	FF	R _{solsat} (Ω.m)	FF	R _{solsat} (Ω.m)	FF	R _{solsat} (Ω.m)	FF	R _{solsat} (Ω.m)	FF
Água destilada	7700	328	0,04	197	0,03	12,5	0,0016	2368	0,31	1140	0,15
Água de torneira	175,4	540,7	3,08	189,9	1,08	-	-	2462	14,04	1080	6,16

A areia argilosa coletada por Yamasaki (2009) obteve, pelos ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica dos sólidos aproximadamente os mesmos valores obtidos para amostra 4 definida anteriormente, aumentando-se a possibilidade de terem sido retirados de locais próximos. Como Mondelli (2008) realizou seus ensaios em amostras indeformadas, a seguir serão apresentados os resultados de ensaios complementares obtidos por Yamasaki (2009) em amostra deformada.

Pelo ensaio de permeabilidade a carga variável obteve-se o coeficiente igual a $7,9 \times 10^{-10}$ m/s, para o corpo-de-prova compactado com teor de umidade ótima igual a 14,2% e a massa específica aparente máxima de $1,86 \text{ g/cm}^3$, sendo esses últimos valores resultados do ensaio de compactação por proctor normal (Figura 3. 43).

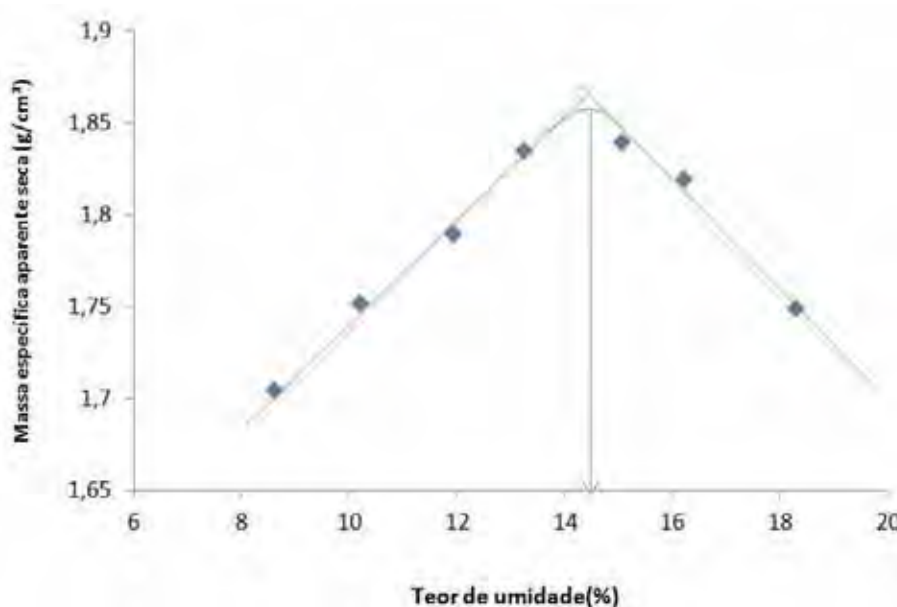


Figura 3. 43 – Curva de compactação obtida por Yamasaki (2009)

O ensaio de azul de metileno seguiu-se o do método de Fabbri (1994), classificando-se como solo ativo com o coeficiente de atividade (CA) igual a 76,408 g/ 100g de argila.

Os resultados do ensaio de Mini-CBR, para o corpo-de-prova compactado na umidade ótima igual a 14,41% e massa específica aparente máxima de 1,82 g/cm³, foram:

CBR natural:	Mini-CBR _{nat} = 40,3 %
CBR inundado:	Mini-CBR _{inund} = 25,8 %
Expansão:	exp = 0,06 %
Retração:	ret = 0,13 %

Para finalizar, analisando-se a **Tabela 3. 8** a amostra foi classificada no grupo das areia siltsas e areias argilosas não-lateríticas (NA') pelos ensaios de mini-MCV e perda por imersão.

Tabela 3. 8 – Parâmetros do ensaio de mini-MCV (Yamasaki, 2009)

d'	c'	Pi	e'
37,5	1,24	128%	1,22

Aeroporto Estadual de Piracicaba “Pedro Morganti”

Esta amostra foi escolhida por apresentar características que a diferem do solo da região de Bauru, representando uma parcela da variedade encontrada no estado de São Paulo.

A outra amostra de solo a ser estudada nessa dissertação foi retirada do mesmo local (**Figura 3. 44**) analisado por Silva (2006), formado pelo intemperismo de diabásio, que devido as características tropicais da região ocorre com bastante intensidade.



Figura 3. 44 - Foto do local da coleta (Silva, 2006)

Assim os dados apresentados a seguir são análises realizadas por Silva *et al.* (2006). Os índices físicos estão apresentados na **Tabela 3. 9** e a curva granulométrica está representada pela **Figura 3. 45** com 61% de argila, 18,1 de silte e 20,9% de areia.

Tabela 3. 9 - Valores de índices físicos obtidos para solo argiloso. (SILVA, 2006)

Data	W (%)	γ_s (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	η (%)	e	Sr (%)
26/11/2005	24,45	25,94	19,71	15,84	38,91	0,637	99,57

Obs: ρ_s – massa específica dos sólidos; ρ – massa específica do solo; ρ_d – massa específica aparente seca; η – porosidade; e – índices físicos; Sr – grau de saturação; W – umidade.

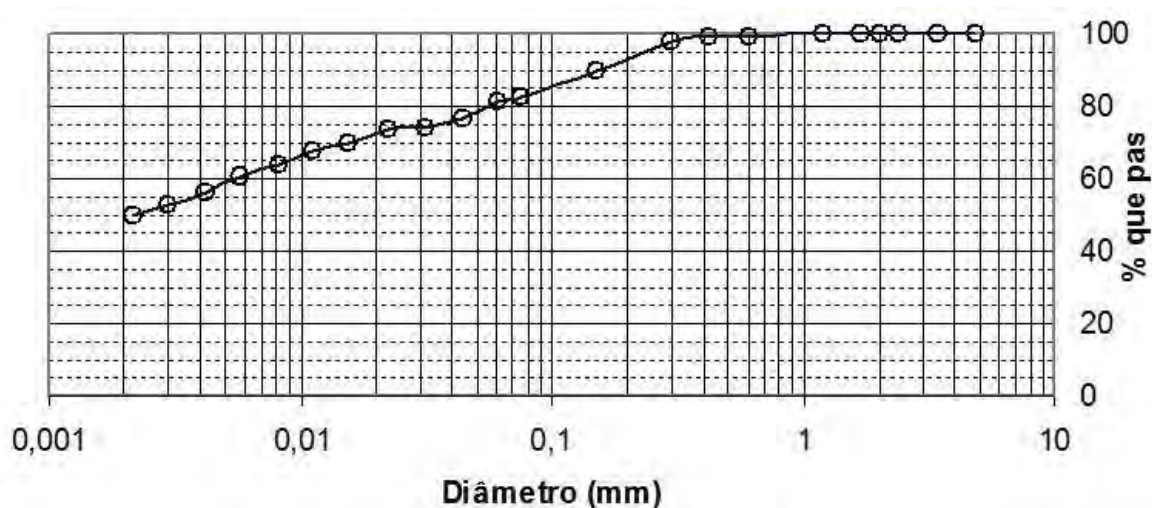


Figura 3. 45 - Curva granulométrica (SILVA, 2006)

No ensaio de limites de consistência Silva *et al.* (2006) obteve o limite de liquidez igual a 49,10% e limite de plasticidade igual a 36,22%, logo o índice de plasticidade foi de 12,88%.

Pela curva de compactação da **Figura 3. 46** observa-se que a massa específica aparente máxima de 1,596g/cm³ foi atingida com o teor de umidade ótima em 27,04%.

Pelos ensaios de mini-CBR elaboraram-se as curvas de mini-CBR em função do teor de umidade no estado natural e no estado inundado, conforme **Figura 3. 47**, e analisou-se a variação da expansão e retração dos corpos-de-prova, como se observa na **Figura 3. 48**. Sendo que para a umidade ótima 26,4% desde ensaio obteve massa específica aparente máxima igual a 1,628g/cm³, com valor de mini-CBR_{natural} de 11,8% e mini-CBR_{inundado} de 7,6%. Neste mesmo teor de umidade não se constatou expansão do corpo-de-prova, porém uma retração de 1,5% foi calculada.

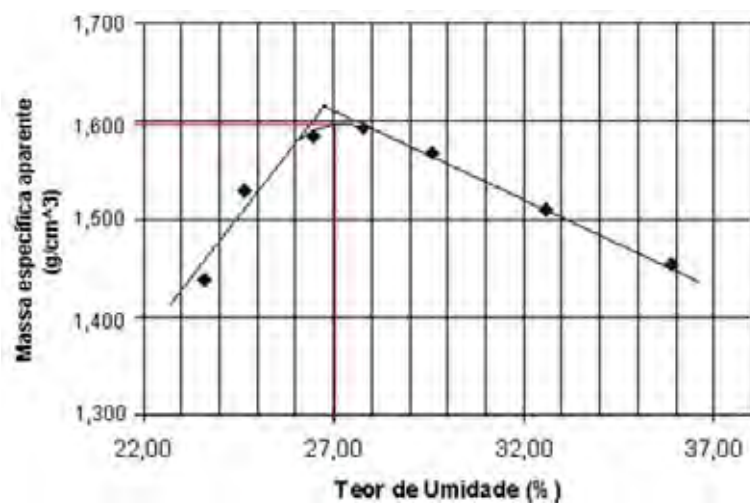


Figura 3. 46 - Curva de compactação (SILVA, 2006)

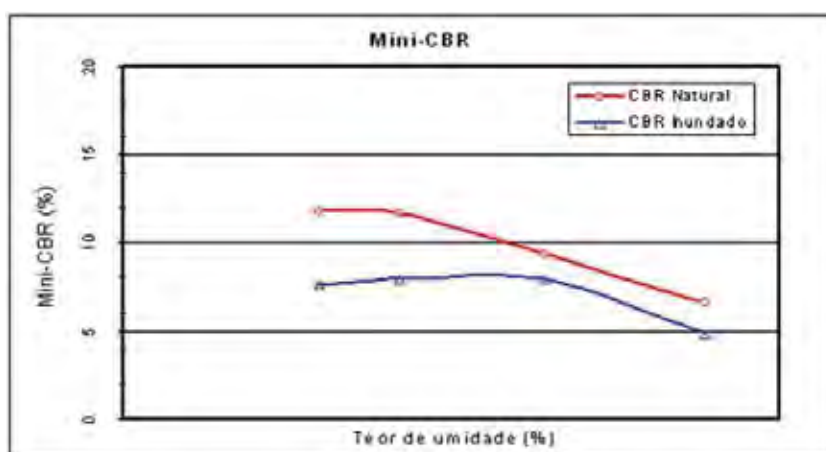


Figura 3. 47 – Representação gráfica dos valores de mini-CBR (Silva, 2006)



Figura 3. 48 – Representação gráfica das curvas de expansão e retração (Silva, 2006)

Por fim, dos ensaios de mini-MCV obteve-se os resultados dos parâmetros da **Tabela 3. 10** pela análise os dados apresentados nas **Figura 3. 49**, **Figura 3. 50** e **Figura 3. 51**. Assim, foi classificada como argila com comportamento não laterítico.

Tabela 3. 10 - Parâmetros do ensaio de mini-MCV (Silva *et al.*, 2006)

d'	c'	Pi	e'
17,0	1,57	112,5%	1,32

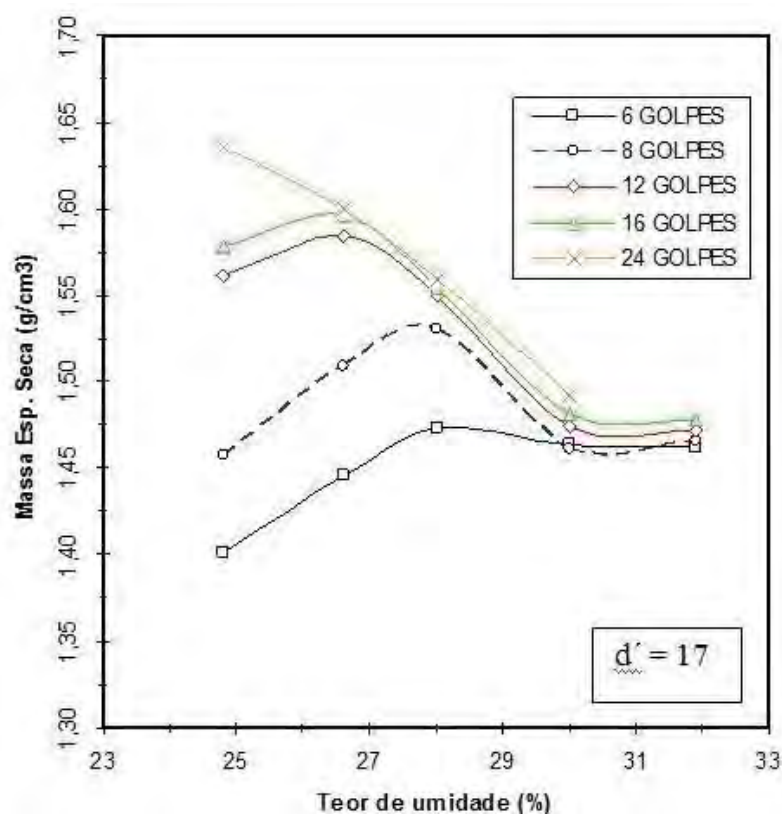


Figura 3. 49 – Ensaio de compactação da amostra argilosa (Silva, 2006).

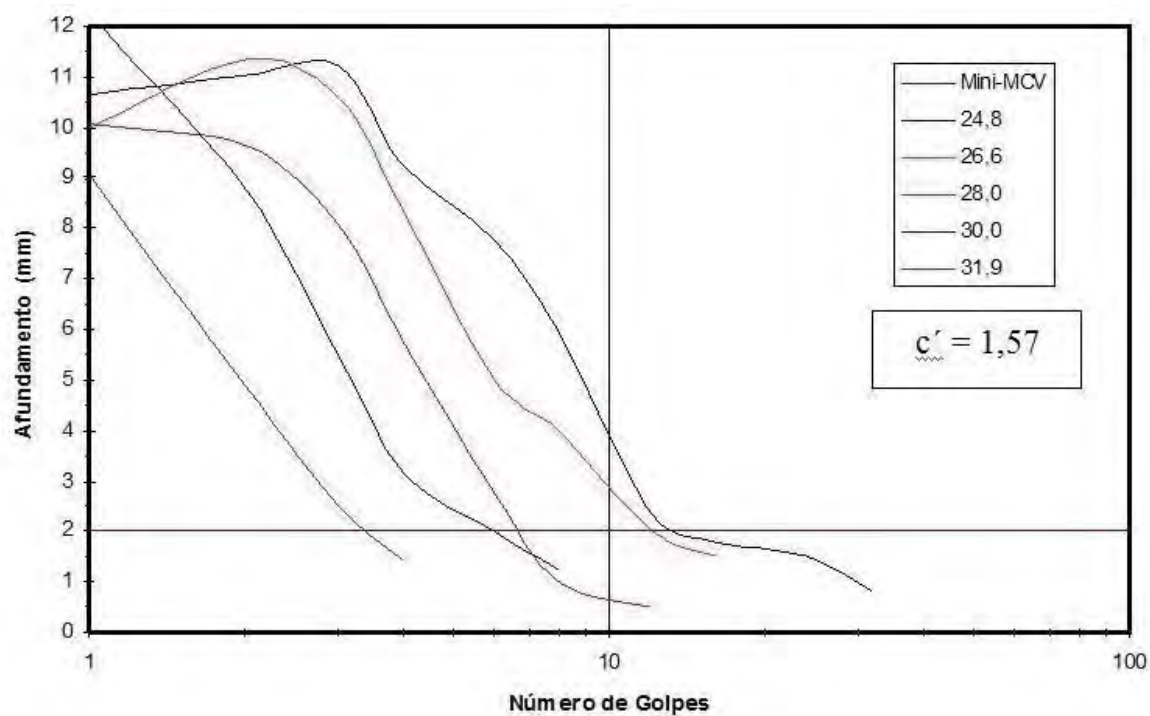


Figura 3. 50 - Número de golpes x afundamento (Silva, 2006).

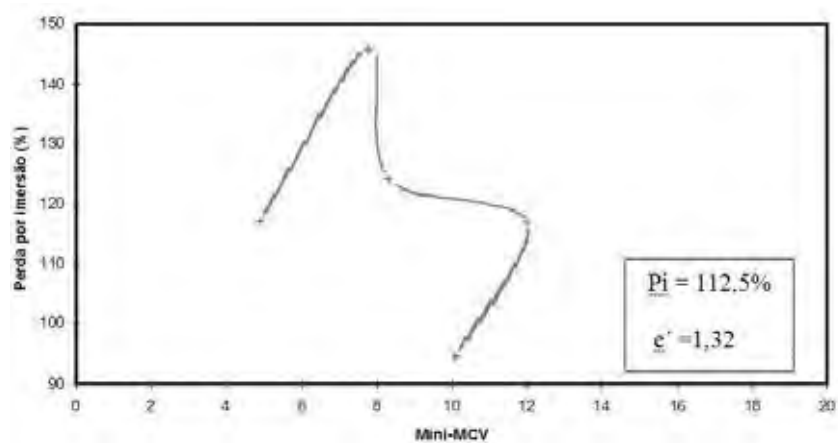


Figura 3. 51 – Mini-MCV x perda por imersão (Silva, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados os materiais utilizados nessa pesquisa. Embora tenham sido extraídas de pontos próximos aos locais já estudados por outros autores, conforme visto na revisão bibliográfica, o material coletado pode apresentar algumas diferenças ou mesmo ter sofrido algum processo de intemperismo devido ao tempo exposto aos fatores ambientais. Assim, na sequência serão descritos os métodos dos ensaios de caracterização e outros ensaios complementares aplicados as amostras bem como os resultados obtidos, sendo que todos foram realizados garantindo-se a repetitibilidade dos resultados.

Antes de dar início aos ensaios de resistividade elétrica houve-se a necessidade de desenvolver equipamentos e acessórios, uma vez que ainda não existem materiais comercializados para essa finalidade em laboratório. Por se tratar de uma pesquisa de cunho experimental, esses equipamentos tiveram de ser adaptados algumas vezes para atender os critérios práticos. Logo, os detalhes dos projetos, a confecção dos produtos e as adaptações podem ser encontradas tanto nos itens a seguir como na metodologia dos ensaios.

Encerrando esse item, será descrito a metodologia dos ensaios com a leitura da resistividade elétrica.

4.1 Coleta das Amostras

A escolha das amostras para realização dessa dissertação foi baseado nos estudos já realizados por outros autores, pois a proposta visava proporcionar a avaliação da medida da resistividade em amostras de solos diferentes.

Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru

A amostra deformada aqui denominada como solo Bauru foi coletada no dia 10 de agosto de 2010 no aterro de resíduos sólidos de Bauru, localizado próximo a Rodovia Marechal Rondon (SP-300), ao lado de duas penitenciárias estaduais, como se pode observar na **Figura 4. 1**, e na **Figura 4. 2** o talude do qual o material foi extraído com teor de umidade natural de 6,9%.



Figura 4. 1 - Foto aérea da localização do aterro de resíduos sólidos de Bauru. (Google maps 2010)



Figura 4. 2 - Fotos do talude pelo qual foi extraída a amostra em Bauru.

Aeroporto Estadual de Piracicaba / Pedro Morganti

A amostra aqui denominada como solo Piracicaba foi coletada no dia 9 de dezembro de 2010 na estrada de acesso ao aeroporto estadual de Piracicaba pela Via Comendador Pedro Morganti, próximo a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo – USP/ campus de Piracicaba, conforme se observa na **Figura 4. 3** e o talude pelo qual o material foi extraído está ilustrado na Figura 4. 4 com teor de umidade natural de 16,6%.



Figura 4. 3 - Localização da coleta do solo: Via Comendador Pedro Morganti - Entrada para o Aeroporto Estadual de Piracicaba. (Google maps 2010)



Figura 4. 4 - Fotos do talude pelo qual foi extraída a amostra em Piracicaba.

4.2 Caracterização e ensaios complementares

Todas as etapas descritas a seguir foram aplicadas para ambas as amostras, ou seja, provenientes do aterro de resíduos sólidos de Bauru e do entorno do aeroporto de Piracicaba.

Primeiramente estas foram preparadas para a implementação de todos os ensaios, sendo secas ao ar, passadas a seco na peneira de malha 2,00 mm (#10), destorroadas com o almofariz e acondicionados em sacos plásticos. Assim, os ensaios de caracterização e compactação dos solos foram realizados seguindo as normas especificadas na **Tabela 4. 1**. Lembrando-se que a repetibilidade foi garantida realizando-se três vezes cada experimento.

Tabela 4. 1 - Normas e métodos referentes aos ensaios

Ensaio	Norma ou Método de ensaio
Massa Específica dos Sólidos	NBR 6508/84
Granulometria Conjunta	NBR 7181/84
Limite de Liquidez	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade	NBR 7180/84
Compactação	NBR 7182/86
Mini-CBR	DNER-ME 254/97
Mini-MCV	DNER -ME 258/94
Perda por Imersão	DNER-ME 256/94
Adsorção de Azul de Metileno	Fabbri (1994) e Pejon (1992)

Em seguida descrever-se-ão os métodos utilizados para execução de cada ensaio visando esclarecer melhor quanto aos detalhes não citados na norma e os resultados desses ensaios serão apresentados em conjunto do Solo Bauru com aqueles obtidos com o Solo Piracicaba com a finalidade de compará-las e melhor distinguir as características de cada amostra.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos da Faculdade de engenharia de Bauru – UNESP – campus de Bauru. Assim, inicialmente as amostras foram identificadas como areia argilosa marrom avermelhada para o Solo Bauru e argila arenosa roxa escura para o solo Piracicaba.

❖ **Ensaio de Massa Específica dos Sólidos**

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 6508/84 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica.

Sabendo-se que as amostras possuem características distintas, uma arenosa e a outra argilosa, foram reservados previamente 60g e 50g, respectivamente, em água destilada por no mínimo 12 horas. Passado esse período, a mistura foi introduzida em um dispersor de solos (**Figura 4. 5**) para garantir a desagregação das partículas e deixou-se agitar por 10 minutos.

Em seguida, introduziu-se a mistura ao balão volumétrico e acrescentou-se água destilada, aproximadamente, até o nível médio do frasco (500cm^3 a 20°C). Para garantir a expulsão do ar contido na amostra, ligou-se o conjunto a uma bomba de vácuo durante 30 minutos, com detalhe na **Figura 4. 6**. Completou-se o balão com água deaerada e pesou-se. Foram medidos em pelo menos cinco temperaturas diferentes.



Figura 4. 5 - Dispersor de solos e balão volumétrico com a amostra de solo e água destilada.



Figura 4. 6 – Sistema com a bomba de vácuo para retirada de ar da mistura de solo com água destilada.

A massa específica determinada pela NBR 6508/84 – Grãos de solos que passam na peneira de $4,8\text{ mm}$ – foi $2,643\text{g/cm}^3$ para o Solo Bauru e $2,863\text{g/cm}^3$ para o Solo Piracicaba.

❖ Granulometria Conjunta

A amostra de aproximadamente 120g foi deixada previamente em repouso úmido com uma solução de hexametáfosfato de sódio (45,7g/1.000 l). Decorrido o período de no mínimo 12 h de repouso, a mistura foi transferida ao dispersor de solos para bater por 15min. Recolheu-se a mistura numa proveta de capacidade 1.000 cm³ adicionando água destilada até completar esse volume.

A suspensão foi homogeneizada e realizaram-se as leituras no densímetro nos tempos pré-definidos, medindo-se simultaneamente a sua temperatura. Completada a leitura de 24 horas, lavou-se o material e colocou-se para secar em estufa à temperatura constante e igual a 100°C.

Para finalizar, a amostra seca foi despejada em um conjunto de peneiras, que por sua vez foram levadas ao agitador mecânico por 10 min. Assim, cada fração retida nas peneiras foi medida na balança.

Este procedimento também foi aplicado substituindo a solução defloculante de hexametáfosfato de sódio por água destilada, para verificar o real comportamento do solo.

Em ambas as amostras, todo o solo passou pela peneira #10 (2,00 mm). Assim, as curvas de distribuição granulométrica com e sem o uso do defloculante apresentam-se na **Figura 4. 7**.

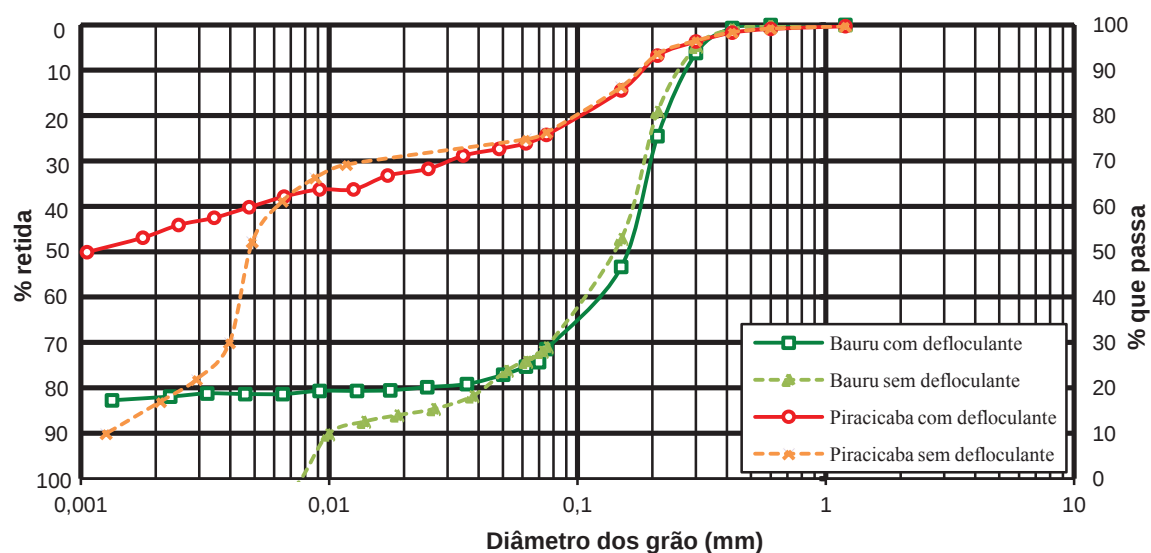


Figura 4. 7 - Curva granulométrica com e sem defloculante.

A porcentagem de cada fração representada nas curvas da **Figura 4. 7** podem ser encontradas na **Tabela 4. 2**, disposto segundo a NBR6502/95.

Tabela 4. 2 – Resultados obtidos no ensaio de granulometria conjunta das amostras com e sem defloculante.

Amostra	Argila ($\phi < 0,002$)	Silte ($0,002 < \phi < 0,060$)	Areia fina ($0,060 < \phi < 0,2$)	Areia média ($0,2 < \phi < 0,6$)	Areia grossa ($0,6 < \phi < 2,0$)
Bauru c/ defloculante	18	6	46	30	0
Bauru s/ defloculante	0	26	51	22,8	0,2
Piracicaba c/ defloculante	54	20	18,5	6,6	0,9
Piracicaba s/ defloculante	16	58	18,5	6,7	0,8

Logo, pode-se observar que a principal variação da curva granulométrica ocorreu na interface argila/silte em ambas as amostras, pois sem a adição do defloculante as partículas de argila permanecem agregadas as outras de dimensões maiores.

Sendo que no solo Bauru sem o uso do defloculante, essa ligação entre as partículas resultou no comportamento nulo da fração argila.

❖ Limites de Consistência

(a) Limite de Liquidez de Casagrande

Os equipamentos utilizados no ensaio apresentam-se na **Figura 4. 8**.

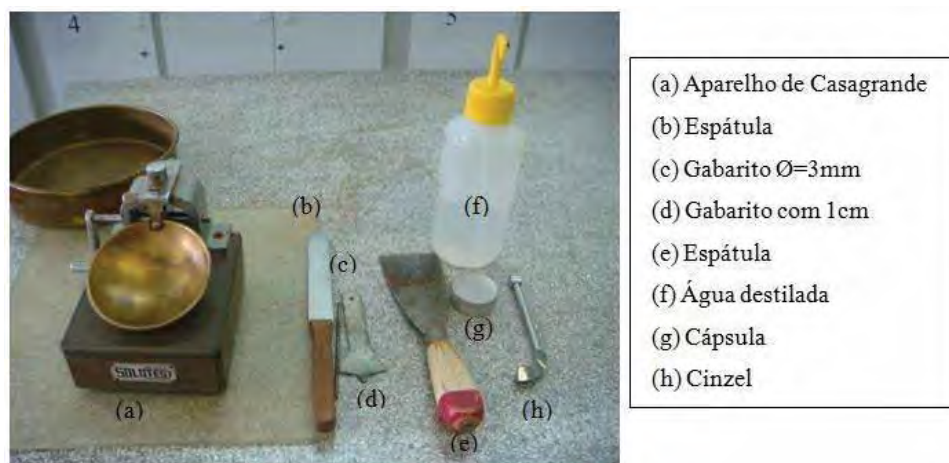


Figura 4. 8 - Foto dos materiais utilizados nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.

Separou-se aproximadamente 100g de solo passado na peneira #40 (0,42mm), depositou-o sobre uma placa de vidro esmerilhada e adicionou-se água suficiente até formar uma pasta.

Após homogeneizar, assentou-se a pasta na concha do aparelho de Casagrande e moldou-se a superfície com a espátula. Com o auxílio do cinzel abriu-se um sulco (1mm) ao longo do plano de

simetria do aparelho. Girou-se a manivela contando o número de golpes necessários ao fechamento da ranhura, a uma velocidade constante e próxima a de 2 golpes por segundo.

No espaço em que ocorreu a união das bordas, se retirou uma porção de solo para posterior determinação da umidade. Repetiu-se o ensaio para diferentes teores de umidade adicionando-se água destilada.

(b) Limite de Plasticidade

Com a pasta formada no ensaio de Limite de Liquidez, adicionaram-se porções de solo passadas na peneira #40 (0,42mm) gradativamente até obter a consistência desejável para moldá-la. Assim, sobre a placa de vidro esmerilhada, rolou-se a pasta com a palma da mão em movimentos leves.

O procedimento foi interrompido quando o bastonete de solo alcançou o diâmetro de 3mm e simultaneamente o aparecimento de fissuras no mesmo.

Os resultados obtidos pelos ensaios de Limite de Liquidez de Casagrande e Limite de Plasticidade estão apresentados na **Tabela 4. 3**, tal como a classificação unificada.

Tabela 4. 3 - Limites de consistência

Amostra	Limites de Consistência			Classificação Unificada
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
Bauru	23,2	0	NP	Areia argilosa não plástica
Piracicaba	41,9	28,4	13,6	Argila arenosa com plasticidade baixa a média

❖ Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação seguiram os procedimentos especificados pela NBR 7182/86 para Proctor Normal com secagem prévia e com reuso de material.

Assim, compactou-se uma amostra de 3kg de solo homogeneizado com água a quantidades pré-determinadas no molde de 1.000 cm³ em 3 camadas com 26 golpes/camada utilizando-se o soquete de 2,5kg com altura de queda de 30,5cm, conforme execução ilustrada na **Figura 4. 9**. Para a aquisição da umidade, retirou-se uma porção da amostra compactada da camada central e foi levada para secar em estufa.

O procedimento foi repetido até que obtivesse pelo menos dois pontos abaixo e dois acima da umidade ótima na curva de compactação, para tanto foi adicionando-se 2,5% de umidade sobre a massa inicial.



Figura 4. 9 - Foto da execução do ensaio de proctor normal.

Por meio do ensaio de compactação utilizando Proctor normal, traçou-se a curva da **Figura 4. 10** e obtiveram-se os resultados da **Tabela 4. 4**.

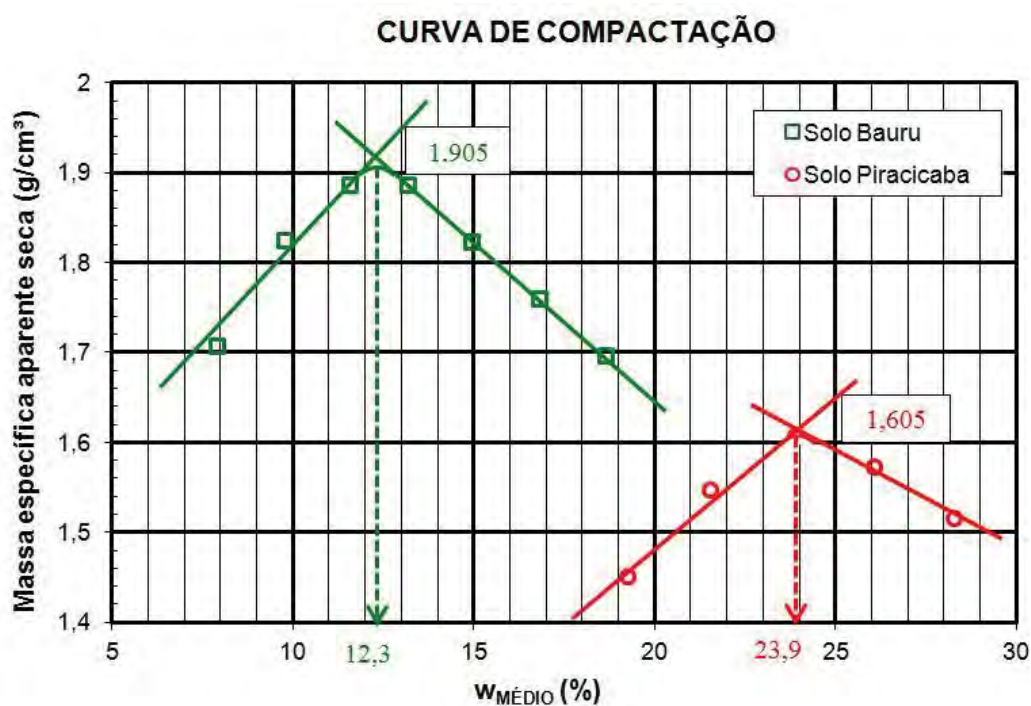


Figura 4. 10 - Curva de compactação por Proctor normal

De uma forma geral pode-se dizer que, para o mesmo esforço de compactação, atinge-se nos solos arenosos maiores valores de massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{smáx}$) sob menores teores de umidade ótima (h_{ot}), do que nos solos argilosos. (VARGAS, 1977)

Tabela 4. 4 – Resultados do ensaio de compactação

Amostra	Teor de Umidade Ótimo (%)	Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)
Solo Bauru	12,3	1,905
Solo Piracicaba	23,9	1,605

❖ Ensaio de Mini-CBR

O ensaio de mini-CBR foi desenvolvido no Iowa State University (Iowa Bearing Value – IBV). Nogami (1972) fez adaptações (corpo de prova de $\varnothing=50,0\text{mm}$ e pistão de penetração de $\varnothing=16,0\text{mm}$) para correlacionar como CBR obtido segundo a norma do DNER.

O mini-CBR sem imersão permite se determinar a capacidade de suporte com vários tipos de sobrecarga, com vários teores de umidade e energias de compactação, com lâmina d'água na ocasião da penetração do pistão. Na **Figura 4. 11** demonstra-se o esquema de montagem para a determinação da capacidade de suporte.

**Figura 4. 11** - Fotos da montagem do equipamento de determinação da capacidade de suporte.

Para dar início ao ensaio, os corpos de prova foram moldados em cilindros de acordo com as adaptações realizadas por Nogami (1972), com 5 golpes em cada face com energia intermediária (massa do soquete igual a 4.500g), nas umidades pré-estabelecidas pelo ensaio de compactação, ou seja, além o teor de umidade ótimo mais dois pontos acima e dois abaixo da curva. Sendo que, para cada teor de umidade, foram moldados dois corpos-de-prova para posterior ensaio de expansão e retração com os mesmos. A altura de queda do soquete foi de 30cm.

Com o primeiro conjunto de corpos-de-prova em diferentes umidades rompeu-os na prensa para determinação da capacidade de suporte sem imersão. Na sequência, conforme **Figura 4. 12** fizeram-se as leituras de retração nos extensômetros sincronizadamente.

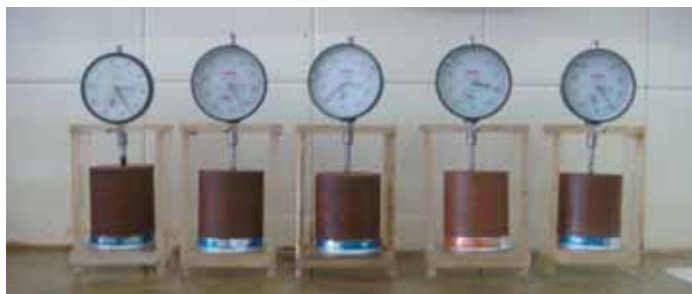


Figura 4. 12 - Foto do ensaio de mini-CBR colocado para retração.

Já o segundo conjunto foi colocado para imersão com sobrecarga para determinação das leituras de expansão no extensômetro, segundo **Figura 4. 13**.



Figura 4. 13 - Foto do ensaio de mini-CBR colocado para expansão.

Após 24 horas imersos em água, os corpos-de-prova foram retirados e mantidos inclinados para escorrer o excesso de água por 15 minutos. Voltando-os a posição inicial deixou-se em repouso por 1 hora para eliminar o efeito da poro-pressão.

Assim, semelhante ao mini-CBR sem imersão, colocou-se os corpos de prova para determinar a capacidade de suporte, com vários teores de umidade e energias de compactação, com lâmina d'água na ocasião da penetração do pistão.

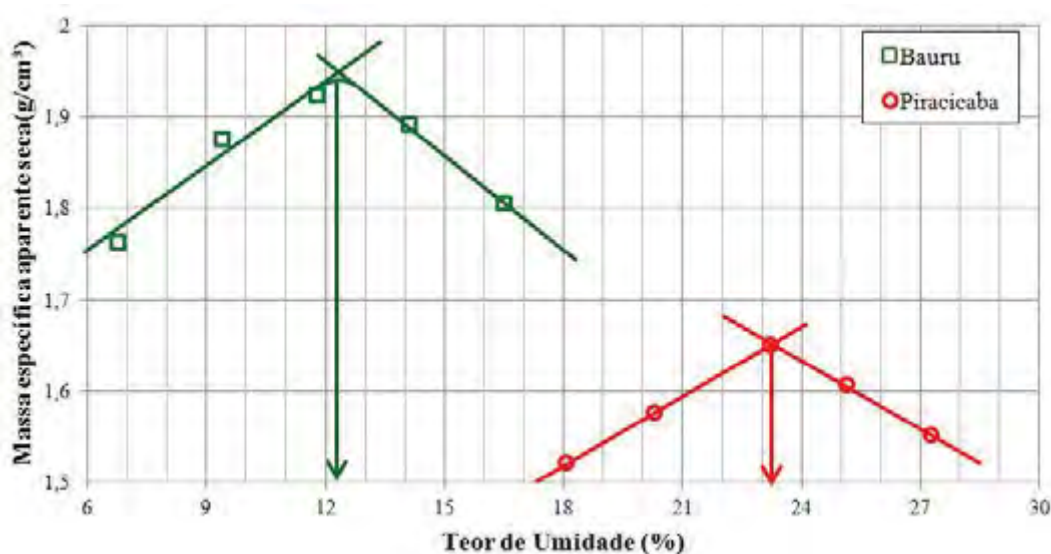
Os resultados foram analisados de acordo com a **Tabela 4. 5**.

Tabela 4. 5 – Valores numéricos das propriedades (NOGAMI e VILLIBOR, 1995 modificada)

SUPORTE Mini-CBR (%) (C/ SOBRECARGA PADRÃO	Muito Elevado Médio Baixo	> 30 12 a 30 4 a 12 < 4	PERDA DE SUPORTE Mini-CBR POR IMERSÃO (%)	Elevada Média Baixa	>70 40 a 70 <40
EXPANSÃO (%)	Elevada Média Baixa	> 3 0,5 a 3 < 0,5	CONTRAÇÃO (%)	Elevada Média Baixa	> 3 0,5 a 3 <0,5

Os resultados estão apresentados em forma dos gráficos da curva de compactação e, expansão e retração são representadas, respectivamente, nas **Figura 4. 14** e **Figura 4. 15** e na sequência as análises dos mesmos estão dispostos na **Tabela 4. 6**.

Analisando a **Figura 4. 14** e **Tabela 4. 6** verifica-se que argilas possuem propriedades para reter maior quantidade de água nos vazios no momento da compactação e a curva de compactação formada pelo ensaio com equipamentos mini é próxima àquela formada pelo ensaio de proctor normal.

**Figura 4. 14** - Curva de compactação do ensaio de Mini-CBR

O suporte mini-CBR_{natural} foi obtido sem sobrecarga, portanto não se pode classificá-lo quanto aos valores encontrados na **Tabela 4. 5**. No entanto, verifica-se que o Solo Bauru possui índice mais elevado que o Solo Piracicaba ao ser compactado na umidade ótima. O Solo Bauru também se mostrou melhor quanto ao suporte mini-CBR_{inundado} em relação ao Solo Piracicaba, no entanto ambos resultaram em valores abaixo de 40%, assim foram classificados com índice baixo.

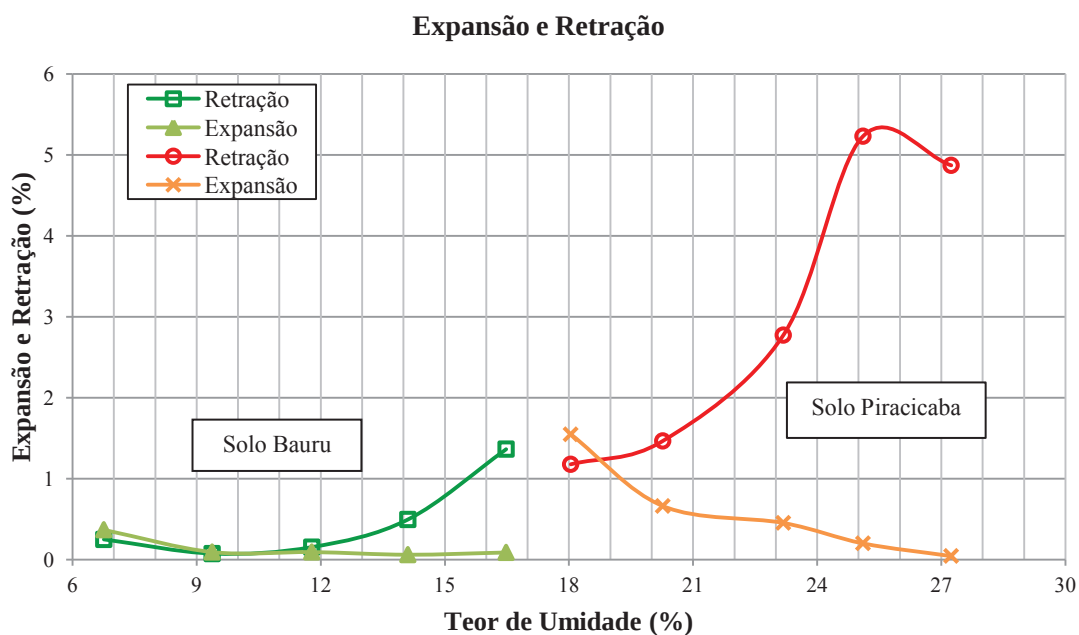


Figura 4. 15 - Curva de expansão e retração do ensaio de mini-CBR

Tabela 4. 6 - Valores da umidade ótima ($w_{ótima}$), massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$), e os correspondentes $CBR_{natural}$, $CBR_{inundado}$, expansão e retração obtidos no ensaio de mini-CBR

Solo	$W_{ótima}$ (%)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	$CBR_{natural}$ (%)	$CBR_{inundado}$ (%)	Expansão	Retração
Bauru	12,2	1,93	26,3	23,0	0,09	0,15
Piracicaba	23,3	1,65	9,5	7,8	0,45	2,77

Os valores de expansão dos dois solos são considerados baixos de acordo com a **Tabela 4. 5**, fato este que Nogami e Villibor (1995) destacam como uma das características de solos lateríticos, em que o valor de expansão é relativamente pequeno, mesmo nas argilas e solos argilosos, quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Os autores ainda observaram que a expansão poderá ser apreciável nas amostras compactadas no ramo seco, também apresentado nas curvas da **Figura 4. 15**.

No entanto, no Solo Piracicaba a retração aumenta exponencialmente com o aumento do teor de umidade de compactação, chegando a alguns pontos a cinco vezes maior em relação ao Solo Bauru, pois, a argila é o elemento predominante com 54% na sua composição. Comportamento verificado para o teor de umidade ótimo, em que a retração do solo Bauru foi classificada como baixa, enquanto o solo Piracicaba de média a alta. Concordando com Nogami e Villibor (1995), se destaca que os argilo-minerais caracterizam-se por possuir uma série de propriedades peculiares, dentre elas, apresentam grandes variações volumétricas, por exemplo, por perda de umidade por secagem.

❖ Ensaio de Mini-MCV

As amostras também foram classificadas segundo a metodologia MCT. Para tanto, foram realizados em conjunto os ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão.

Primeiramente compactou-se 5 corpos de prova em cilindros ($\varnothing = 50,0$ mm), com aproximadamente 200g de solo, a teores de umidade diferentes definidos conforme resultados obtidos no ensaio de compactação (por proctor normal) e energias diferentes (variando o número de golpes). O soquete utilizado foi o de tipo leve de massa igual a 2.270g, com altura de queda de 30cm.

Para cada umidade de compactação, aplicou-se uma sequência de golpes continuamente, isto é, energia crescente até que não ocorresse o aumento de densidade. Obedecendo-se os seguintes critérios de parada:

- $n_{\text{golpes}} - 4n_{\text{golpes}} < 2\text{mm}$;
- atingir 256 golpes;
- houver nítida expulsão da água.

Com os copos de prova moldados no ensaio de Mini-MCV pode-se dar sequência ao ensaio de perda de massa por imersão, deixando-os imersos em água por um período de tempo de 24 horas com 1cm de solo fora do cilindro de compactação sobre um suporte, conforme **Figura 4. 16**. O solo desprendido foi retirado utilizando-se uma cápsula de vidro, obtendo-se, posteriormente, a massa seca contida nesta.



Figura 4. 16 - Foto do ensaio de perda por imersão.

A classificação da amostra foi obtida pela carta da metodologia MCT da, no qual o ponto representativo foi localizado considerando as variáveis c' (o coeficiente angular da reta assimilável a curva Mini-MCV) e e' (índice calculado pela eq. 22).

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (7)$$

Sendo: P_i – perda de massa por imersão; e d' inclinação do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, correspondente a energia de 12 golpes.

Na **Figura 4. 17**, apresenta-se as curvas de compactação formuladas pelos resultados obtidos pelo ensaio de Mini-MCV a 6, 8, 12, 16 e 24 golpes.

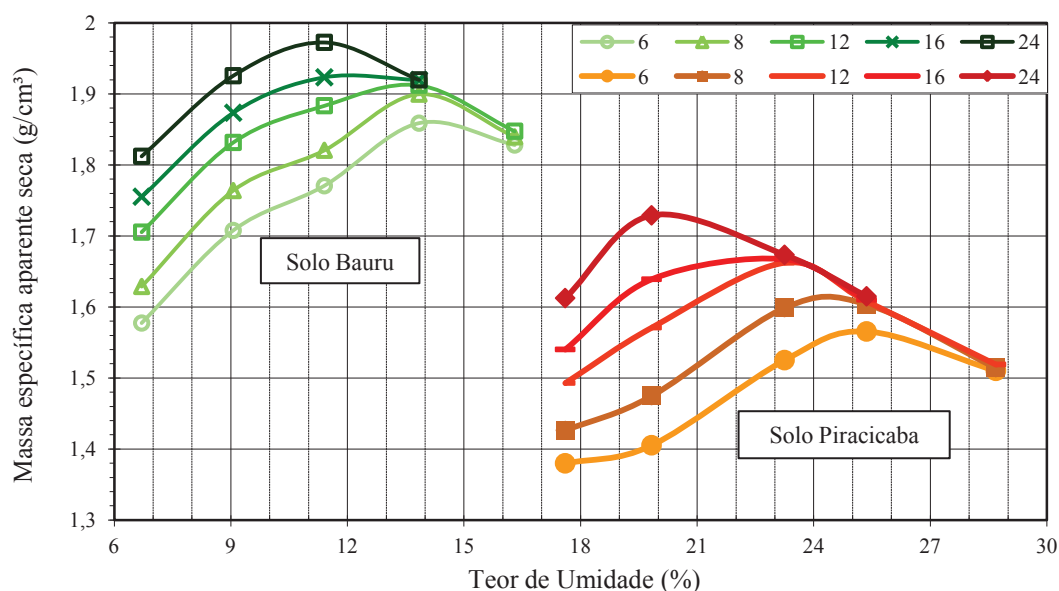


Figura 4. 17 - Curvas de compactação do ensaio de mini MCV

De uma maneira geral, conforme já foi observado nos demais ensaios de compactação, o Solo Bauru possui curvas de compactação com picos mais acentuados e ramo seco aproximadamente retilíneo e o Solo Piracicaba possui também curvas de forma similar, porém com inclinação menos acentuada.

Os valores médios referentes aos ensaios de mini-MCV e perda de imersão estão dispostos na **Tabela 4. 7**, assim como a sua classificação de acordo com a **Figura 4. 18**.

Tabela 4. 7 - Valores do grau de argilosidade (c'), coeficiente d' , grau de laterização (e') e da perda por imerção (P_i)

Solo	c'	d'	e'	P_i	Classificação
Bauru	1,48	53	1,10	71	LA' – Arenoso Laterítico
Piracicaba	1,52	32	1,11	75	LG' – Argiloso Laterítico

Nogami e Villibor (1995) ainda verificaram que o comportamento laterítico começa a se manifestar quando $d' > 20$ e $P_i < 100,0$, correspondendo a ambos os solos aqui em estudo. No entanto, observa-se pela **Figura 4. 18** que os pontos estão localizados próximos aos solos de comportamento não laterítico.

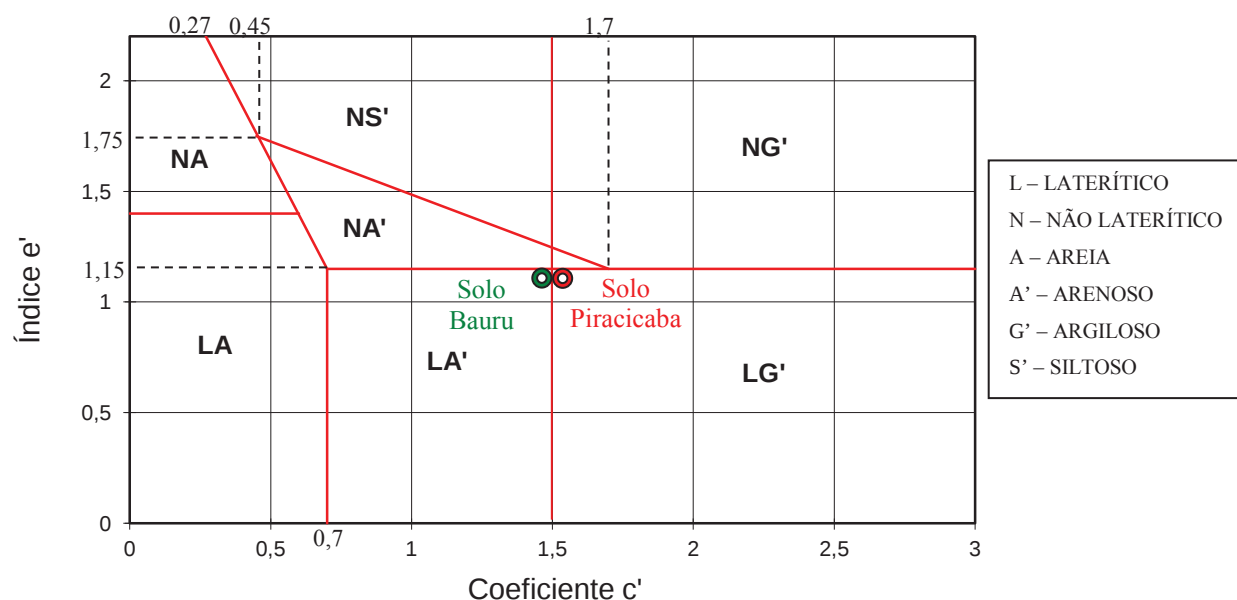


Figura 4. 18 – Carta da metodologia MCT (NOGAMI & VILLIBOR, 1995)

❖ Ensaio de Azul de Metileno

Esse ensaio ainda não possui norma técnica para a sua execução, portanto adotou-se os 2 métodos mais empregados, Pejon (1992) e Fabbri (1994), descritos detalhadamente a seguir. Sendo que, as principais diferenças estão na fração granulométrica utilizada para o ensaio e a concentração da solução de azul de metileno.

Para ambos os métodos foram utilizados os materiais apresentados na **Figura 4. 19** e a montagem do ensaio segue de acordo com a **Figura 4. 20**.



Figura 4. 19 - Foto dos materiais para execução do ensaio de azul de metileno.



Figura 4. 20 – Foto da montagem do equipamento para ensaio de azul de metileno.

(a) Método de Pejon (1992)

A preparação da amostra foi realizada conforme já descrito no início deste capítulo, ou seja, seca ao ar, passada na peneira de 2,00mm (#10) e acondicionada em saco plástico.

Inicialmente mediu-se a umidade da amostra de solo e do azul de metileno em balança com precisão de 0,0001g. Em seguida, preparou-se a solução com a proporção de 1,5g de azul de metileno seco para 1 litro de água destilada. Assim, preencheu-se a bureta graduada com a solução homogeneizada.

Em um becker mediu-se aproximadamente 3g de amostra, adicionou-se 10 ml de água destilada e levou-se o conjunto para o agitador magnético.

Durante o ensaio, a suspensão de solo foi mantida em constante agitação. Dessa forma, adicionou-se 3 ml de solução de azul de metileno e decorridos 3 minutos retirou-se um gota da suspensão com o auxílio de uma haste de vidro e colocou-a sobre o papel filtro (Whatmann's 42).

Analisando-se a mancha formada no papel filtro, se esta apresentasse apenas a coloração azul escura prosseguia o ensaio introduzindo mais 3 ml de solução e assim por diante até que apareça uma auréola azul clara em torno da mancha escura. Surgindo-se a auréola, capturava-se uma gota e esperava-se mais 3 min para verificar se o fato se repetia. Obtendo-se resposta afirmativa, encerrava-se o ensaio com a confirmação da terceira gota, caso contrário repetia-se o procedimento.

Para maior precisão na determinação deste ponto diminuiu-se a quantidade de solução na medida em que se prosseguia o ensaio.

Terminado o ensaio, calculou-se a capacidade de troca de cátions (CTC) e a superfície específica (SE) pelas expressões 23 e 25, respectivamente.

$$CTC = \frac{V.C.100}{M} \quad (8)$$

Sendo: V – volume da solução de azul de metileno gasta (ml); M – massa de solo seco (g); e C – concentração da solução de azul de metileno (normalidade), calculado pela expressão 24.

$$C = \frac{M_{\text{azul}}/E}{V_{\text{água dest.}}/1.000} \quad (9)$$

Sendo: M_{azul} – massa de azul de metileno seco (g); E = Mol/número total de cargas do cátion = 319,88/1g; e $V_{\text{água dest.}}$ – volume de água destilada para a solução (ml).

$$SE = \frac{A.N.m}{M_{\text{am}}.1000} \times \frac{V}{M} \quad (10)$$

Sendo: A – área da face da molécula de azul de metileno ($130\text{\AA}^2$) = 130×10^{-20} ; N – número de Avogadro = $6,02 \times 10^{23}$; m – massa de azul de metileno seco (g); M_{am} – massa molecular do azul de metileno na forma anidra = 319,9; V – volume da solução de azul gasta (ml); e M – massa do solo seco (g).

Para a determinação dos índices referentes ao valor de azul de metileno em g/100g de agregado (V_b) e a atividade de fração de argila em g/100g de argila (A_{cb}) utilizou-se as equações 26 e 27.

$$V_b = \frac{1,5.V}{M.10} \quad (11)$$

Na qual: V – volume de azul de metileno gasto (ml); e M – massa de solo seco (g).

$$A_{cb} = \frac{V_b \cdot 100}{\% \text{argila}} \quad (12)$$

Na qual: Vb – valor de azul de metileno em g/100g de agregado; e %argila – porcentagem de solo com $d < 0,002\text{mm}$.

Pode-se estimar o tipo de argila presente na amostra pela **Tabela 4. 8** de Beaulieu (1979) calculando-se a capacidade de troca de cátions (CTC) e com probabilidade de acerto de 85%, o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos, conforme **Figura 4. 21**.

Tabela 4. 8 - Capacidade de troca de cátions de diferentes tipos de argilas, obtida por métodos tradicionais (Beaulieu, 1979) *apud* Pejon (1992).

ARGILA	CTC (meq/100g)
Caolinita	3-5
Haloisita 2 H ₂ O	5-10
Haloisita 4 H ₂ O	10-40
Ilita	10-40
Montmorilonita	80-150
Clorita	10-40
Atapulgita	20-30
Vermiculita	100-150

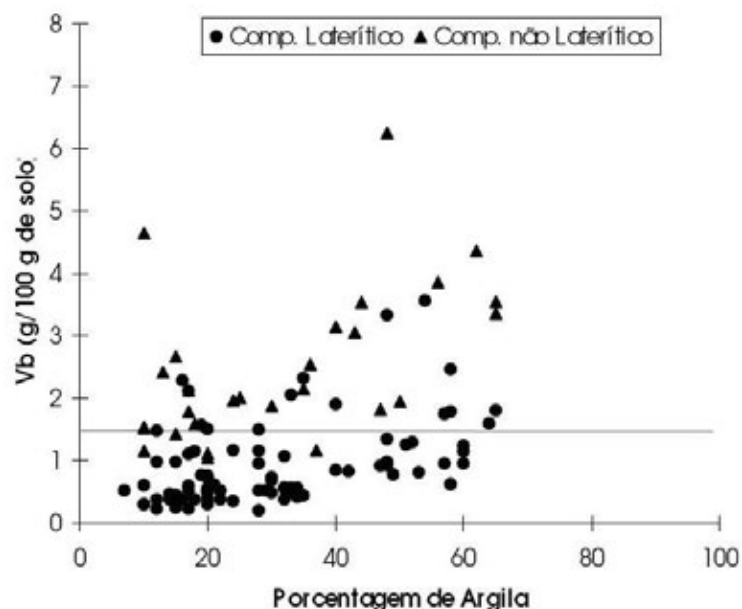


Figura 4. 21 – Valor de azul do solo (Vb), em função da porcentagem de argila, para solos de comportamento laterítico e não laterítico, PEJON (1992) *apud* (Bonini, 2005)

No entanto, há um maior grau de incerteza naqueles solos cujo Vb está entre 1,5 e 2,5, pois existem, em número equivalente, materiais com comportamento laterítico e não laterítico. Nesses

casos, segundo o Pejon (1992), deve-se recorrer a outras técnicas para a previsão de seu comportamento. O autor ainda verificou que os materiais de comportamento laterítico, em sua grande maioria, apresentam o índice A_{cb} inferior a 4g/100g de argila, enquanto os não lateríticos, acima de 5g/100g de argila. (apud BONINI, 2005)

Com os dados do papel filtro (**Figura 4. 22**) utilizado no ensaio foram calculados a capacidade de troca de cátions (CTC), a superfície específica (SE), o valor de azul (V_b) e a atividade da fração argila (A_{cb}) e apresentados na **Tabela 4. 9**.

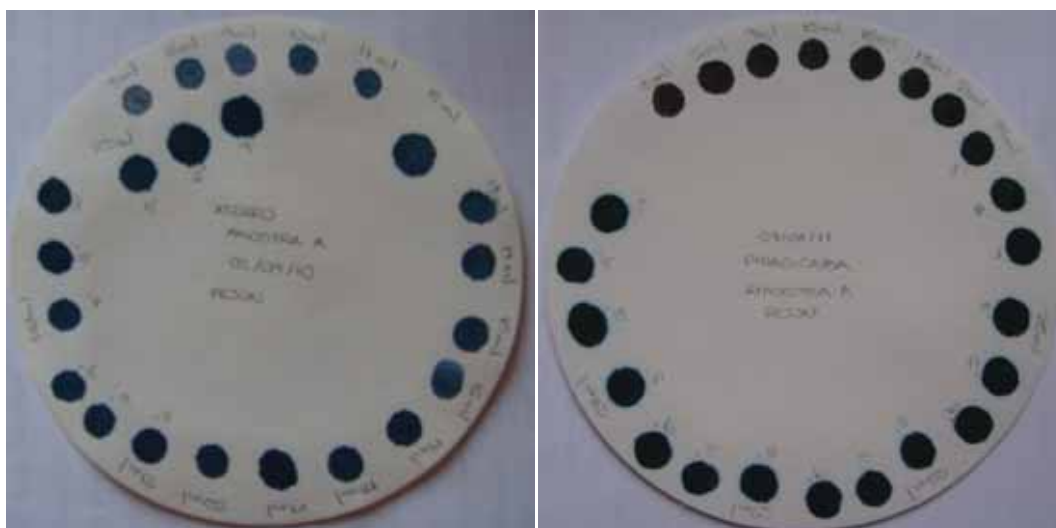


Figura 4. 22 - Foto do resultado do papel filtro com o solo Bauru e com o solo Piracicaba pelo método de Pejon

Tabela 4. 9 - Cálculo e análises do ensaio de azul de metileno pelo método de Pejon

Solo	% arg.	Cálculos			
		CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g de agregado)	A_{cb} (g/100g de argila)
Bauru	18	3,84	30,03	1,21	6,71
Piracicaba	55	4,88	38,17	1,56	2,85

Analisando-se os valores obtidos para CTC e comparando-os aos da **Tabela 4. 8** estima-se que o argilo-mineral presente em maior quantidade em ambos os solos pode ser a caolinita, visto que o valor de CTC abrange a faixa entre 3 e 5.

Quanto ao valor de azul, ambas as amostras podem ser consideradas com comportamento laterítico. Embora o solo Piracicaba apresente valor um pouco acima observado pela **Figura 4. 21**, Pejon (1992) ressalta que há um grau de incerteza naqueles solos cujo V_b está entre 1,5 e 2,5. Assim, com a combinação dos ensaios anteriores confirma-se esse comportamento.

A atividade para o Solo Bauru foi classificada como normal de acordo com o diagrama de atividade das argilas elaborado por Lautrin (1989) *apud* Pejon (1992). Enquanto o Solo Piracicaba embora possua metade da sua composição concentrada na fração fina, apresentou atividade inferior ao Solo Bauru, sendo classificado como inativa. Isto se deve, possivelmente, a rocha que deu origem ao solo e ao grau de intemperismo.

(b) Método de Fabbri (1994)

A amostra foi passada na peneira de abertura 0,075 (#200). Os procedimentos de preparação da solução de azul de metileno são similares ao método de Pejon, mudando-se apenas a concentração de azul de metileno para 0,1g/100ml de água destilada.

Em um becker mediu-se 1g de amostra, adicionou-se 100 ml de água destilada e agitou-se o conjunto para homogeneização. Seguindo o procedimento do ensaio colocou-se o conjunto no agitador magnético e preencheu-se a bureta graduada com a solução. Inseriu-se 1 ml da solução e cronometrou-se 1 min. Transcorrido o tempo, capturou-se uma gota da suspensão contida no becker e depositou-a no papel filtro para verificação da reação.

O procedimento é repetido até formar uma auréola azul clara ao redor do núcleo central. Formando-se a auréola, aguarda-se por mais 3 min. sem acrescentar a solução padrão de azul de metileno, e novamente captura-se uma gota da suspensão, depositando-a no papel filtro. Se ainda assim persistir, aguardam-se mais 3 min. para verificação da mancha e cessa-se o ensaio anotando-se o volume consumido. No caso da mancha não perdurar, o procedimento reinicia-se introduzindo mais 1 ml de solução.

Terminado o ensaio, calculou-se o valor de azul (V_a) e a atividade da fração argila (CA) pelas expressões 28 e 29.

$$V_a = V \cdot \left(\frac{\% \text{ passa na \#200}}{100} \right) \cdot \left(1 + \frac{w}{100} \right) \quad (13)$$

Em que: V – volume de solução gasta (ml); %passa na #200 – porcentagem que passa na #200; e w – teor de umidade (%).

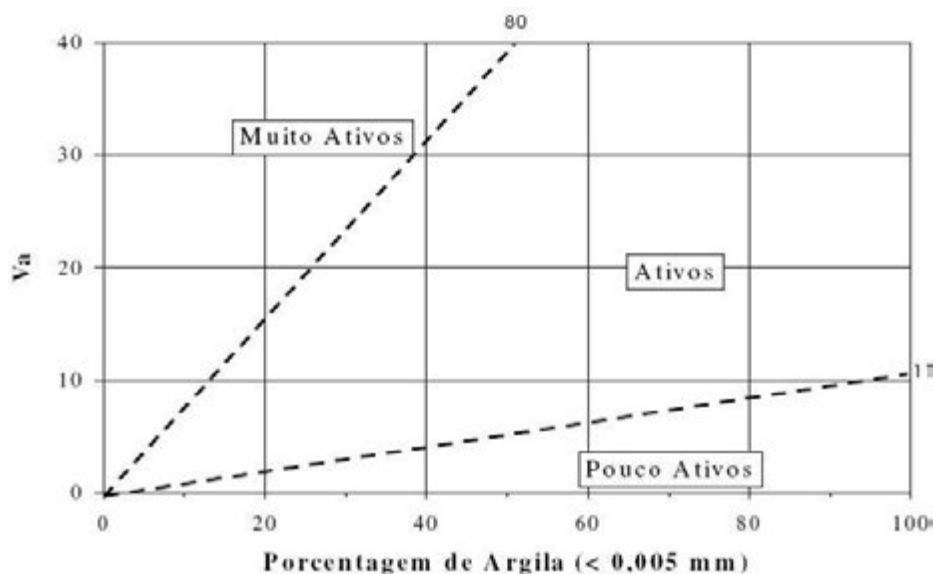
$$CA = \frac{V_a \cdot 100}{\% \text{ argila}} \quad (14)$$

Em que: V_a – valor de azul; e %argila – porcentagem de solo com $d < 0,002\text{mm}$.

Assim, a atividade da argila pode ser classificada pela **Tabela 4. 10** ou pelo ábaco da **Figura 4. 23** e estimar a qual grupo de argilo-mineral pelos valores contidos na **Tabela 4. 11**.

Tabela 4. 10 – Classificação da atividade da fração argila pelo método de Fabbri (1994)

CA	Valores	Grupos
Pouco ativo	$CA < 11$	Montmorilonitas e vermiculitas
Ativo	$11 < CA < 80$	Caulinitas e/ou ilitas, ou combinações
Muito ativo	$CA > 80$	Materiais inertes, argilo-minerais laterizados ou combinações

**Figura 4. 23** - Ábaco para caracterização da atividade da fração argila dos solos, FABBRI (1994) *apud* BONINI (2005)**Tabela 4. 11** - Valores de azul (V_a) e coeficiente de atividade (CA), em função da superfície específica. (FABBRI, 1994)

Grupos de Argilo-Minerais	Superfície Específica (m^2/g)	CA ($10^{-3}g/g$)	V_a^1 ($10^{-3}g$)	Grau de Atividade
Montmorilonitas	860	350	350	Muito Ativo
Vermiculitas ²	200	82	82	
Ilitas	74	30	30	Ativo
Caulinitas	48	20	20	
Laterizados ³	27	11	11	Pouco Ativo

Os dados obtidos pelo método de Fabbri podem ser observados no papel filtro utilizado no ensaio, conforme **Figura 4. 24**, e também estão contidos na **Tabela 4. 12**, juntamente com o valor de azul (V_a) e o coeficiente de atividade (CA) de cada amostra.



Figura 4. 24 - Foto do resultado do papel filtro com o solo Bauru e com o solo Piracicaba pelo método de Fabbri

Tabela 4. 12 - Classificação da fração fina das amostras pelo método de Fabbri (1994)

Solo	P _{argila} < (0,005)	V _{azul} (ml)	Va (10 ⁻³ g/g de solo)	CA (g/100g de argila)	Classificação
Bauru	18%	32	9,65	53,59	Ativo
Piracicaba	40%	22	18,58	34,40	Ativo

Analogamente ao método de Pejon, o Solo Piracicaba apresentou coeficiente de atividade inferior ao Solo Bauru, no entanto ambos são classificados como ativos. Obtendo essa confirmação ao inserir o par de valores, porcentagem de argila e valor de azul, no ábaco da **Figura 4. 23**.

Interessante observar que os resultados obtidos em ambos os métodos do ensaio de azul de metileno classificam os solos de forma que se contrapõe ao comportamento laterítico apresentado no ensaio de mini-MCV, no entanto ambos os solos estão muito próximos a linha que separa os solos de comportamento lateríticos dos não-lateríticos, conforme **Figura 4. 18**. Nogami e Villibor (1995) também verificaram que para certos solos essa linha apresenta, na realidade, uma pequena inclinação que não foi possível se calcular com suficiente precisão.

4.3 Equipamentos

O fundamento dos ensaios é medir a corrente e a voltagem transmitida de uma placa de cobre a outra através do solo estudado e assim obter por correlações o valor da resistividade. Contudo, como se sabe, os ensaios com equipamentos miniatura são normalmente fabricados em aço inoxidável, assim para não haver influência do cilindro metálico nas respectivas leituras foram confeccionados equipamentos em *tecnyl* envoltos com abraçadeiras para o ensaio de compactação e com adaptações para o ensaio de permeabilidade.

O ensaio de permeabilidade por sua vez, antevisto que a avaliação da resistividade se daria por meio da variação do fluido de percolação, necessitou-se elaborar um painel de carga variável com acesso ao reservatório de alimentação do sistema.

Concluída a etapa de saturação do corpo-de-prova, se mostrou interessante o estudo mais detalhado da variação da resistividade com a capacidade de retenção de água nos vazios da amostra, para tanto, foram confeccionados anéis de moldagem e discos de PVC do ensaio para determinação da curva de retenção de água.

4.3.1 *Cilindro de compactação*

O cilindro de compactação (**Figura 4. 25** e **Figura 4. 26**) foi confeccionado em *tecnyl* com as mesmas medidas do cilindro utilizado para os ensaios de mini-MCV e mini-CBR.

O *tecnyl* é um material da família dos polímeros, cuja estrutura química é baseada na poliamida 6.6 reforçada com fibras minerais e/ou sintéticas e aditivos químicos específicos, as principais características desse material são menor peso específico e maior resistência mecânica. Outras características desse material que o fizeram ser extremamente adequado a função a qual ele foi estipulado são alta resistência ao desgaste e abrasão, grande resistência a agentes químicos, alta resistência ao choque e baixo coeficiente de atrito. (SILVA, 2009)

No entanto, durante a realização dos primeiros ensaios observaram-se alterações nos resultados, devido ao material escolhido para a confecção do cilindro. Assim, para garantir maior rigidez do mesmo foram acopladas seis abraçadeiras, com rosca sem fim, igualmente espaçadas.

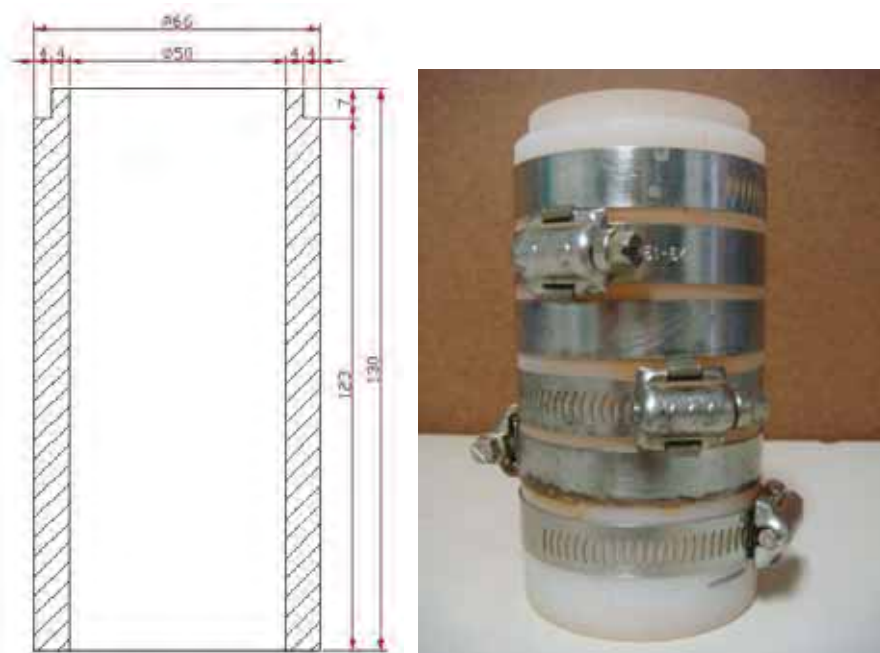


Figura 4. 25 – Projeto do cilindro sem escala com as medidas em milímetros.

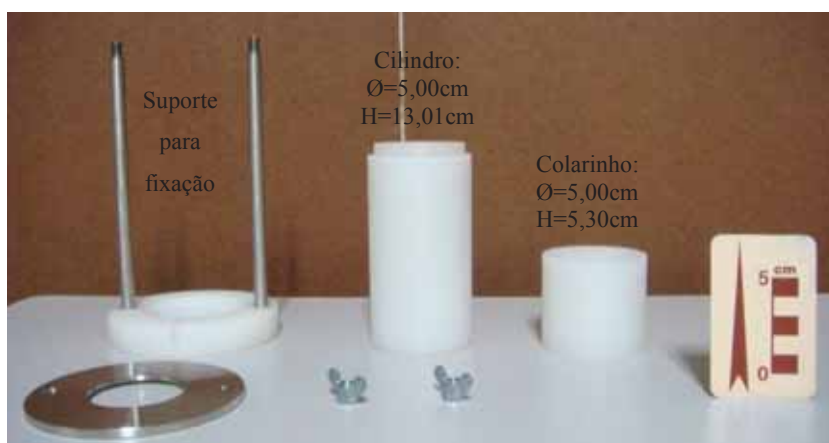


Figura 4. 26 – Equipamento para o ensaio de compactação.

Quanto ao suporte de fixação, como se pode observar na **Figura 4. 27**, seguiu-se o modelo adotado em pesquisas anteriores, visto que o suporte utilizado para os ensaios mini não atendia os propósitos gerando muita perturbação durante o processo de compactação.



Figura 4. 27 – Mini-cilindro de compactação e modelo do cilindro grande.

Como o estudo enfatiza a percolação do solo com a variação do teor de salinidade no fluido de percolação e para não haver influência de nenhum outro material na leitura da resistividade após a saturação do corpo-de-prova, foram projetados acessórios (**Figura 4. 28**) compatíveis a esse mini-cilindro, assim pôde-se evitar o surgimento de perturbações na amostra.

Na **Figura 4. 29** estão ilustrados os componentes internos a tampa e as suas dimensões podem ser visualizadas na **Figura 4. 30**. Essas duas peças se diferem da base e do ralo inferior,

respectivamente, por não possuir uma saliência de 11mm para o encaixe do cilindro e a borda do ralo aumentar para 8,25mm.

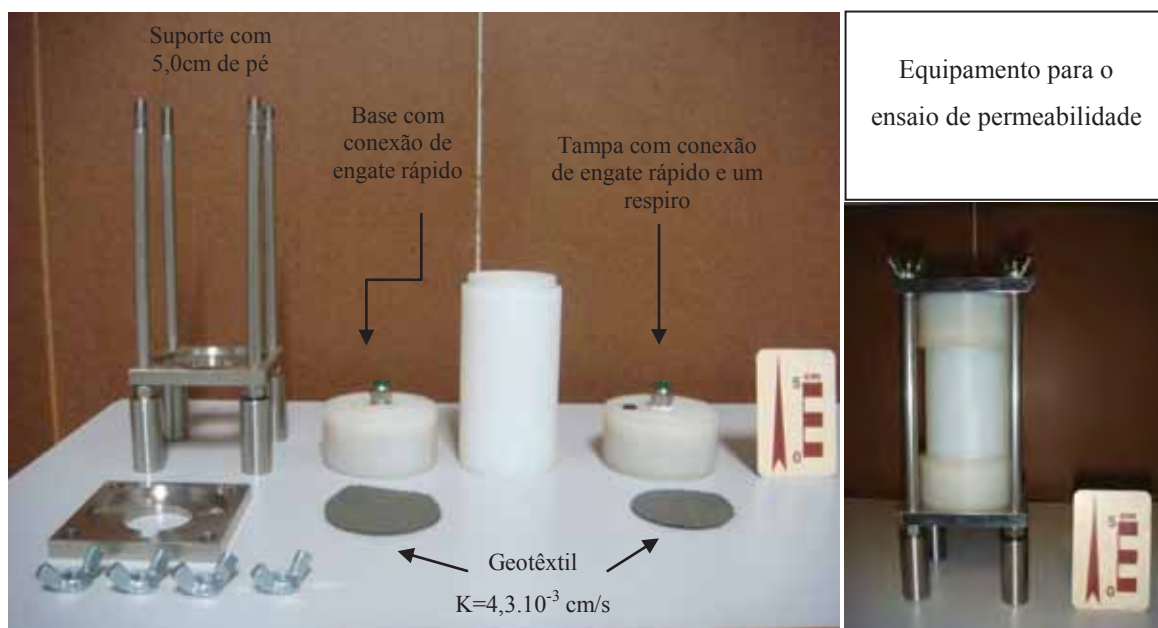


Figura 4. 28 – Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade no mini-cilindro.



Figura 4. 29 – Detalhe da tampa e do ralo superior.

Verificou-se a permeabilidade do geotêxtil, simulando o ensaio de permeabilidade a carga variável com os equipamentos desenvolvidos para essa pesquisa, pois este não poderia ser inferior ao das amostras de solo, caso contrario dificultaria a passagem de água.

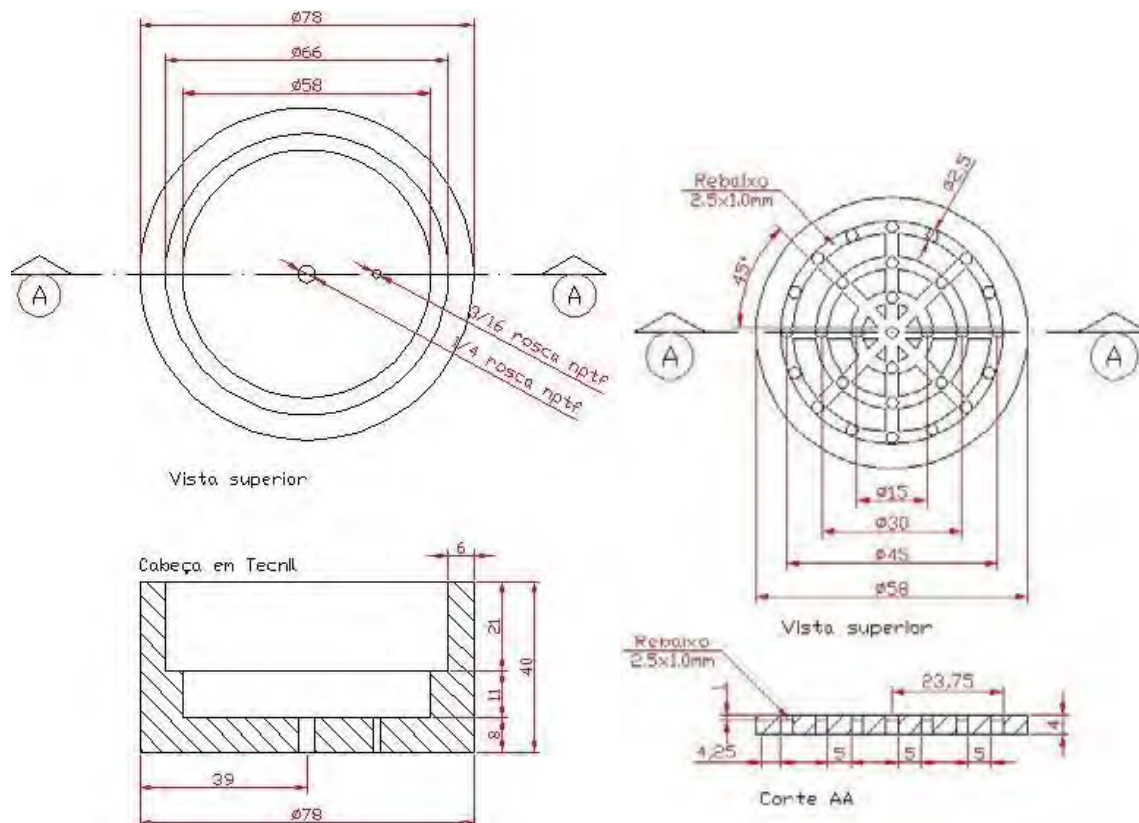


Figura 4. 30 – Projeto da tampa e do ralo superior sem escala e com as medidas em milímetros.

Pinto (2006) considera que para areias argilosas e argilas possuem, respectivamente, coeficiente de permeabilidade da ordem de grandeza de 10^{-7} e de 10^{-9} m/s. Logo, como o geotêxtil resultou em um coeficiente de $4,3 \cdot 10^{-5}$ m/s (**Figura 4. 31**), este atende as necessidades das amostras estudadas pois o seu coeficiente é superior a dez vezes ao das amostras de solo e assim não interfere nos resultados.

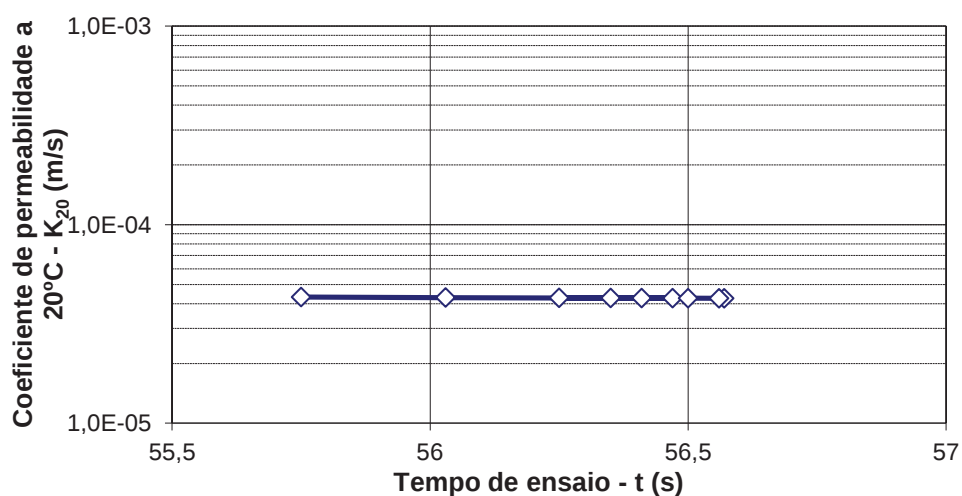


Figura 4. 31 – Coeficiente de permeabilidade a 20°C pelo tempo de ensaio

4.3.2 Painel de permeabilidade

As amostras coletadas para esse estudo são constituídas por grande quantidade de finos. Logo, para essa escala granulométrica Caputo (1988) considera mais vantajoso o uso do permeâmetro de carga variável e assim optou-se pela construção de um painel como se pode verificar na **Figura 4. 32**.



Figura 4. 32 – Foto do painel de permeabilidade a carga variável.

Para a leitura dos níveis de descarga de água, foram fixados tubos de acrílico de 0,4 cm de diâmetro.

A caixa de armazenamento do fluido de percolação tem capacidade volumétrica de 38l. Sendo de plástico para não interferir nas leituras das resistividades e facilitar o deslocamento do gradiente de acordo com a estimativa do coeficiente de permeabilidade, ou seja, a posição em que se encontra na foto da **Figura 4. 32** possibilitaram os ensaios com o Solo Bauru, enquanto que para o Solo Piracicaba foi necessário aumentá-lo. Outro motivo que contribuiu para a escolha desse reservatório foi a possibilidade de acesso e de preparação da solução no próprio recipiente.

4.3.3 Anéis e discos de PVC

Para o ensaio de sucção matricial pela técnica do papel filtro foram confeccionados 21 anéis de PVC para extração dos corpos-de-prova compactados e um par de discos para cada anel (Figura 4. 33, Figura 4. 34 e Figura 4. 35).



Figura 4. 33 – Conjunto de dez anéis de PCV.



Figura 4. 34 – Anel com par de discos.

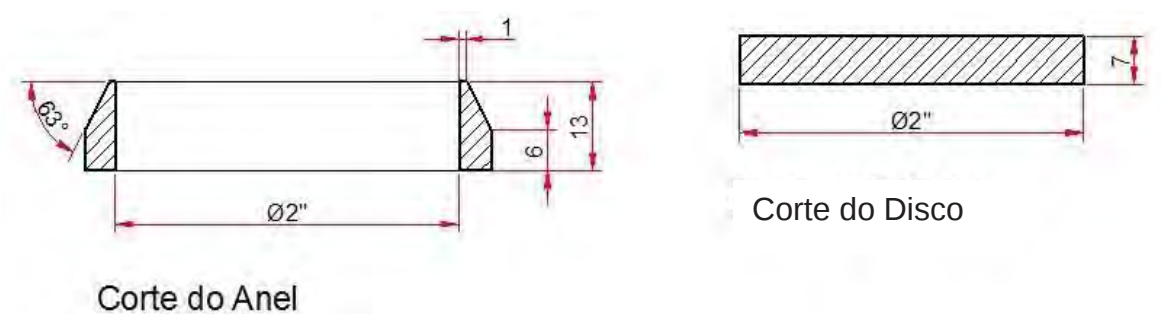


Figura 4. 35 – Projeto dos anéis e bolachas sem escala com medidas em milímetros.

4.4 Métodos de Ensaio para Obtenção da Resistividade Elétrica

Foram realizados ensaios de compactação obtendo resistividade elétrica a cada ponto da curva de compactação. Porém, o ensaio de permeabilidade foi realizado apenas com o ponto correspondente a umidade ótima. E por fim com a finalidade de se analisar mais pontos variando-se o teor de umidade foi realizado o ensaio de determinação da curva de retenção de água pela trajetória de secagem com a aquisição da resistividade.

4.4.1 Ensaio de Compactação

Inicialmente, a energia de compactação do mini-cilindro foi calibrada em relação ao do cilindro utilizado para o ensaio de compactação com o proctor normal pela eq. 30.

$$E_c = \frac{M \cdot g \cdot L \cdot N \cdot n}{V} \quad (15)$$

Em que: M – massa do soquete (kg); g – aceleração da gravidade (m/s²); L – altura do de queda do soquete (m); N = número de golpes por camada; n = número de camadas; e V – volume do cilindro (m³).

O soquete utilizado nos equipamentos mini possui 2,285kg e altura de queda de 0,3m. Assim para o mini-cilindro de 225cm³ de volume, o número de golpes dividindo-se em três camadas com a mesma energia do proctor normal, resultou em 7,4 golpes.

Logo, adotou-se oito golpes em cada camada, no total três. Portanto, a energia de compactação no mini-cilindro foi de 632kJ/m³.

Com esses valores calculados, os primeiros ensaios foram realizados com o Solo Bauru devido a facilidade de manuseio para com este e obteve-se uma curva de compactação muito próxima a curva do proctor normal, ambos com reuso do material. No entanto, ao dar sequência nos ensaios sem o reuso do material, observou-se que a cada conjunto de ensaios a curva deslocava-se para a direita daquela formada nos primeiros testes, como está ilustrado na **Figura 4. 36**.

Com a possibilidade de esse deslocamento estar relacionado ao cilindro absorver parcialmente a energia de compactação, devido o material do qual é feito (*tecnyl*), foram acoplados seis abraçadeiras com rosca sem fim e dessa forma, realizou-se uma nova comparação entre a curva do proctor normal e a curva obtida com o cilindro com as abraçadeiras, conforme **Figura 4. 37**.

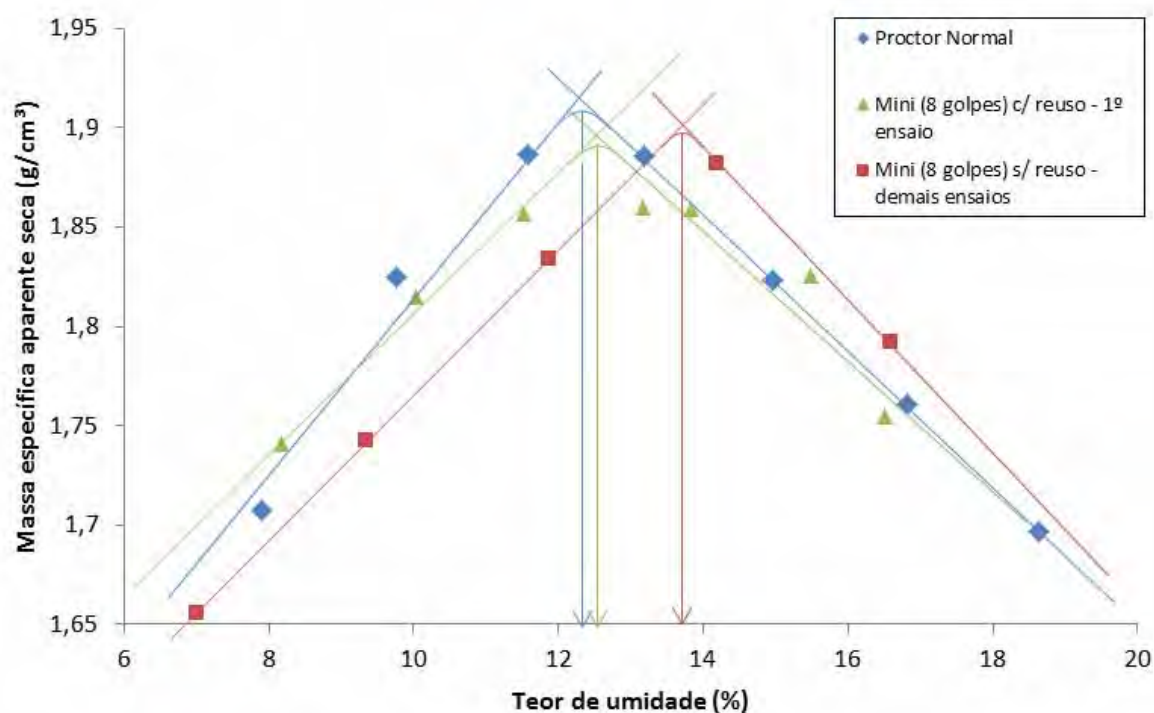


Figura 4. 36 – Comparação entre as curvas de compactação do Proctor normal e mini-cilindro com o Solo Bauru.

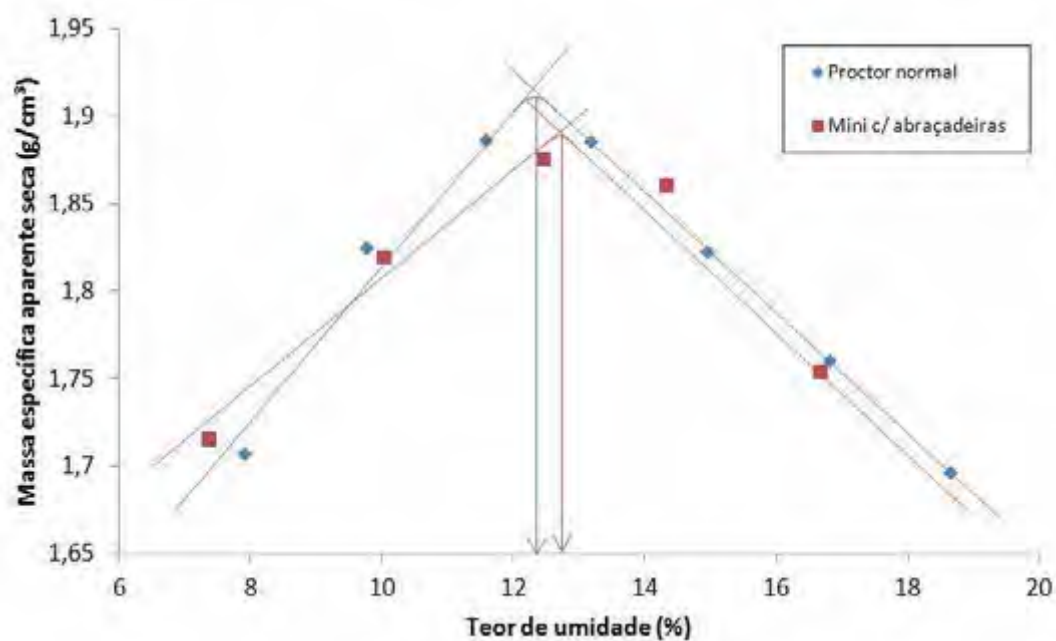


Figura 4. 37 – Comparação entre as curvas de compactação do Proctor normal e do mini-cilindro com as abraçadeiras.

A relação entre o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) do proctor e do mini-cilindro de compactação foi verificada pela equação 31 e obteve resultado considerado satisfatório com o índice muito próximo de 1. Quanto ao valor de teor de umidade ótimo calculou-se a variação (Δw) pela equação 32 e o desvio pela equação 33, valor este considerado baixo.

$$\frac{\gamma_{mini}}{\gamma_{proctor}} = \frac{18,85\text{KN/m}^3}{19,05\text{KN/m}^3} = 0,9895 \quad (16)$$

$$\Delta w = |w_{proctor} - w_{mini}| = |12,3 - 12,7| = 0,4 \quad (17)$$

$$\text{desvio} = \frac{\Delta w}{w_{proctor}} = \frac{0,4}{12,3} = 0,0325 = 3,25\% \quad (18)$$

Realizada a calibração, pode-se dar sequência aos ensaios de compactação simultaneamente com a aquisição da resistividade elétrica a seguir:

❖ Equipamentos

Os equipamentos utilizados para essa primeira etapa, ou seja, o ensaio de compactação, são os mesmos dos ensaios de mini-CBR e mini-MCV, sendo o cilindro do item 4.3.1. Na **Figura 4. 38** são apresentados os materiais utilizados no ensaio para a aquisição da medida da resistividade elétrica

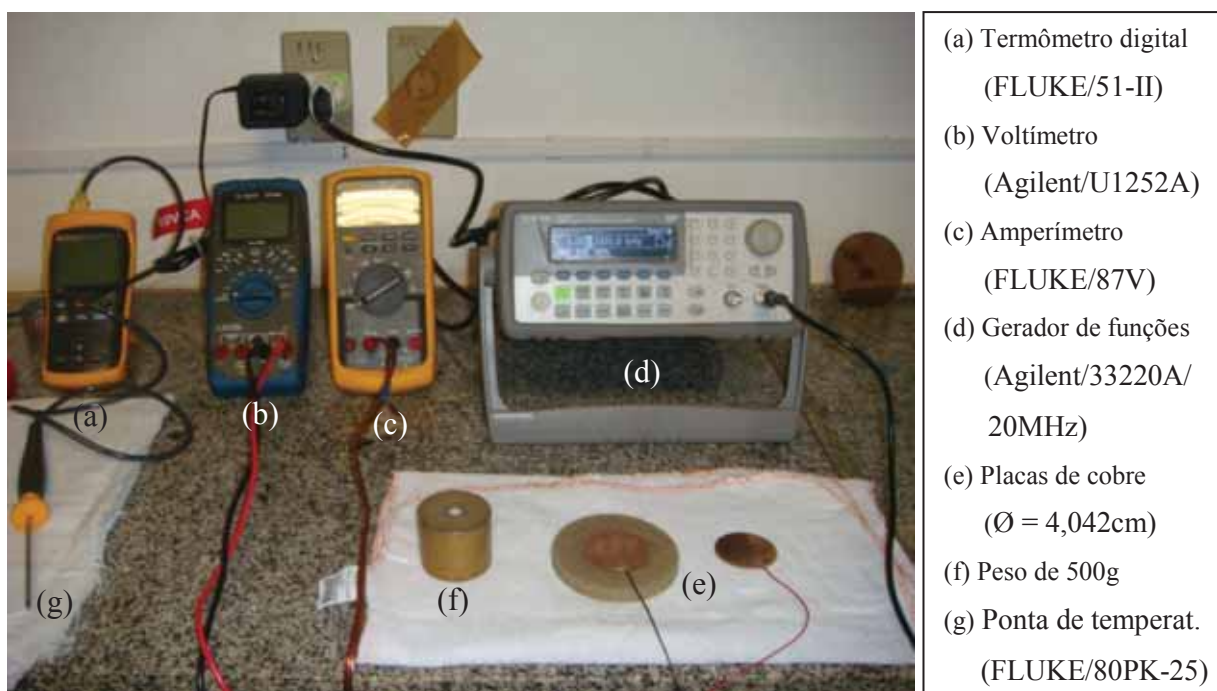


Figura 4. 38 – Foto dos equipamentos utilizados para leitura da resistividade.

❖ Preparação da solução

As soluções foram preparadas no reservatório com capacidade para 38l, **Figura 4. 39**, para realizar tanto o ensaio de compactação como o ensaio de permeabilidade evitando-se assim o desperdício de água destilada.

Os primeiros ensaios foram realizados com água destilada ($1\mu\text{S}/\text{cm}$) e com água de abastecimento ($135\mu\text{S}/\text{cm}$), a seguir como Pregnolato (2011) adicionou-se cloreto de sódio a água destilada na concentração de 250 PPM e 500 PPM, isto é, em termos de condutividade aproximadamente, $500\mu\text{S}/\text{cm}$ e $1000\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figura 4. 39 – Foto do reservatório de água com capacidade para 38 litros.

Logo, para o reservatório de 38l foram necessários 9,5g e 19g de cloreto de sódio para atingir as concentrações desejadas.

❖ Preparação da amostra

A amostra foi previamente preparada seguindo a NBR6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Antes de homogeneizar a amostra, anotaram-se os dados referentes ao líquido, como: a condutividade e da temperatura com o auxílio de um condutivímetro (**Figura 4. 40**).

Devido a realização dos testes para a calibração do mini-cilindro, a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima já haviam sido determinados. Sendo assim, para alcançar pontos próximos a esse par de valores foram definidos cinco pontos previamente.



Figura 4. 40 – Verificação da condutividade do líquido com o condutivímetro da marca Thermo scientific/orion 3 star.

Logo, cada amostra de 600g foi homogeneizada passando pela peneira com abertura de 4,75mm e deixada em repouso durante no mínimo 24 horas em sacos plásticos individuais, conforme **Figura 4. 41**.



Figura 4. 41 – Foto das amostras homogeneizadas e deixadas em repouso por no mínimo 24 horas.

❖ Procedimento

Após 24 horas, primeiramente montou-se o circuito ligando o gerador de funções aos fios conectados as placas. A esse circuito foi inserido um multímetro em série na posição de amperímetro e outro em paralelo na posição de voltímetro para medir os valores de corrente e voltagem, respectivamente.

Conforme observado na **Figura 4. 41**, em algumas amostras o líquido se acumula nas paredes do saco plástico, necessitando ser homogeneizado. Feito isso, retira-se uma pequena quantidade de solo em duas cápsulas para verificar o teor de umidade.

Assim, compactou-se em três camadas com oito golpes de soquete/camada. Após o arrasamento com o auxílio de uma espátula, mediu-se a massa do conjunto. Lembrando que se mediu a tara do cilindro no início do procedimento.

Terminada a etapa de compactação, inseriu-se o cilindro no circuito colocando-se uma placa de cobre em cada extremidade do corpo-de-prova, e para garantir maior contato das placas com o solo pressionou-se levemente com um sobre peso de 500,28g.

Os ensaios prosseguiram o mesmo padrão para os valores de RMS e da curva da onda definidos em pesquisas anteriores, com 6V para RMS e curva senoidal de 50%. Dessa forma, fornecendo-se 1000 Hertz de frequência, foram anotadas as medidas de corrente e voltagem. A montagem do circuito pode ser conferida na **Figura 4. 42**.



Figura 4. 42 – Montagem do circuito para aquisição das leituras de corrente e voltagem.

Na sequência anotou-se a temperatura do solo com o auxílio de um termômetro digital.

Em uma planilha foram calculados para cada par de valores de corrente e voltagem: a sua respectiva resistência pela equação 02, a sua resistividade pela equação 03 e a sua condutividade pela equação 01.

Os dados obtidos foram plotados em dois gráficos: teor de umidade por massa específica aparente seca e; teor de umidade por resistividade.

4.4.2 Ensaio de permeabilidade

❖ Equipamentos

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram os mesmos do item anterior e acrescidos os acessórios confeccionados para possibilitar o confinamento do corpo-de-prova para percolação dos fluidos juntamente com o painel de permeabilidade. Esses materiais estão ilustrados como figuras no decorrer da apresentação do procedimento.

❖ Preparação da solução e da amostra

Escolheu-se o ponto de teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima, determinados pelo ensaio descrito no item 4.4.1, para realizar o ensaio de permeabilidade.

Logo, tanto a preparação da solução como da amostra deste ensaio segue a mesma metodologia empregada no ensaio de compactação.

❖ Procedimento

O objetivo desse ensaio foi a aquisição da resistividade elétrica do solo antes e após a saturação. Assim, a primeira etapa é a compactação, as observações e maiores detalhes encontram-se no subitem 4.4.1.

Inicialmente montou-se o circuito ligando o gerador de funções aos fios conectados as placas. A esse circuito foi inserido um multímetro em série na posição de amperímetro e outro em paralelo na posição de voltímetro para medir os valores de corrente e voltagem, respectivamente.

Da mesma forma, compactou-se em três camadas com oito golpes de soquete/camada. Na camada intermediária, retirou-se uma parcela da amostra para posterior determinação do teor de umidade e mediu-se a temperatura do solo com o auxílio do termômetro digital com a sua respectiva ponteira.

Após essa etapa, mediu-se a massa do conjunto e inseriu-se o cilindro no circuito colocando uma placa de cobre em cada extremidade do corpo-de-prova, e para garantir maior

contato das placas com o solo pressionou-se levemente com um sobrepeso de 500,28g (**Figura 4. 43**).



Figura 4. 43 – Ligação do cilindro ao sistema com o sobrepeso.

Os ensaios prosseguiram o mesmo padrão para os valores de RMS e da curva da onda. Dessa forma, fornecendo-se 1000 Hertz de frequência, foram anotadas as medidas de corrente e voltagem.

Na sequência, a segunda etapa foi o ensaio de permeabilidade a carga variável. Assim sendo, com o reservatório já preenchido com o mesmo fluido utilizado para a homogeneização da amostra deixou-o percolar no sistema até o tanque inferior começar a extravasar pelo orifício (**Figura 4. 44**). Mediu-se a condutividade e a temperatura da água no reservatório e no tanque.

Para possibilitar o confinamento do corpo-de-prova retirou-se as abraçadeiras mais próximas as extremidades e foram acoplados os acessórios da **Figura 4. 29**, com o esquema de montagem observado na **Figura 4. 45**. Internamente entre a tampa e o cilindro, assim como na parte inferior entre o cilindro e a base, foram inseridos o geotêxtil e um *o'ring*.

Com o permeâmetro montado, ligou-o ao painel pelo conector inferior da base e abriram-se todas as válvulas de passagem de água, com a finalidade de obter a saturação do corpo-de-prova por capilaridade, permanecendo assim até atingir a saturação, isto é, quando a água surgisse pelo respiro ou o conector superior da tampa.



Figura 4. 44 – Detalhe do tanque inferior com orifício de escape.

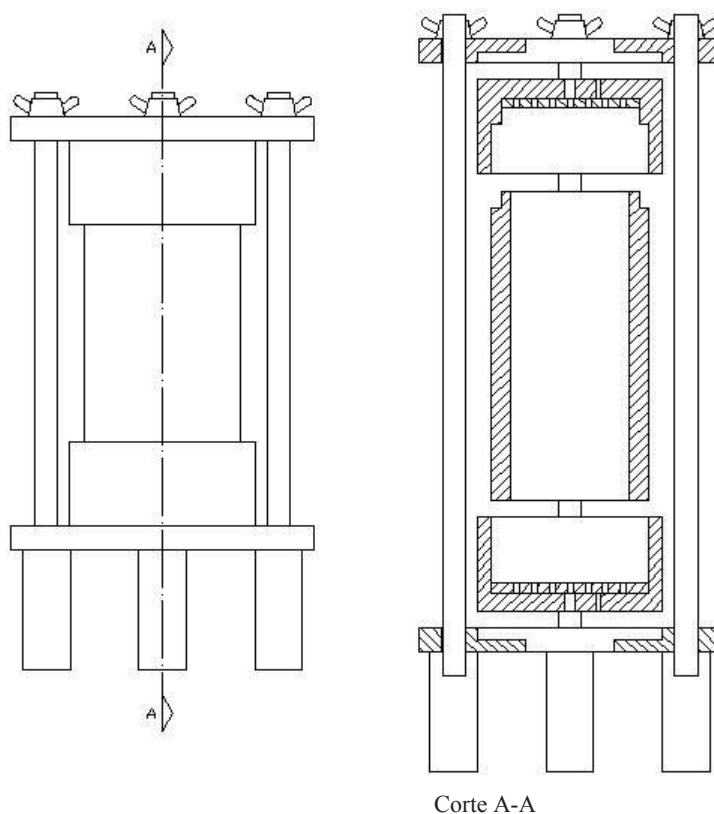


Figura 4. 45 – Sequência para montagem do permeâmetro, sem escala.

Para o solo arenoso o período de espera foi de aproximadamente um dia e meio, e o para o solo argiloso, de 15 a 20 dias. Ocorrendo a saturação, desconectou-se a mangueira do conector inferior passando-a para a tampa, fechou-se o respiro e deixou percolar durante uma hora.

A seguir para a medida da permeabilidade, fechou-se a válvula esférica que liga o reservatório ao tubo milimetrado e anotou-se o nível inicial (h_1) ao mesmo tempo em que acionou o cronômetro.

Quando a coluna d'água atingiu o nível final (h_2) estabelecido, o cronômetro era acionado novamente e anotavam-se esses dados. Juntamente a temperatura da água. O tempo de ensaio também variou conforme o solo, para o solo arenoso aproximadamente 20 minutos e para o solo argiloso 18 horas.

Realizadas no mínimo seis leituras de tempo para cada corpo-de-prova, retirou-se o corpo-de-prova do painel, pesou-se o cilindro com a amostra saturada e mediu-se a corrente e a voltagem. Não se esquecendo de anotar a temperatura da amostra.

Para finalizar o ensaio, tirou-se a umidade em três camadas: topo, meio e base do CP.

Com os dados obtidos calculou-se o coeficiente de permeabilidade pela equação 34 e foi corrigido para 20°C pela equação 35.

$$K_T = 2,3 \cdot \left[\frac{a \cdot L}{A \cdot t} \right] \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad (19)$$

No qual: a – área do tubo de carga (cm^2); L – altura do corpo-de-prova (cm); A – área do corpo-de-prova (cm^2); t – tempo (s); h_1 – coluna inicial (cm); e h_2 – coluna final (cm).

$$K_{20} = K_T \cdot C_K \quad (20)$$

Em que: C_K – fator de correlação

4.4.3 *Ensaio para a determinação da curva de retenção de água*

❖ Equipamentos

Neste ensaio foi utilizado um cilindro maior para compactação das amostras de solo e um soquete de 4,58kg, conforme pode ser observado na **Figura 4. 46**, visto que dessa forma possibilitou extrair um maior número de corpos-de-prova com anéis semelhantes ao ilustrado na mesma figura.

A aquisição da medida de resistividade elétrica foi executada com os mesmos equipamentos dos ensaios anteriores, de compactação e permeabilidade.

Na **Figura 4. 47** são apresentados os materiais necessários para a realização do ensaio de determinação da curva de retenção de água no solo.

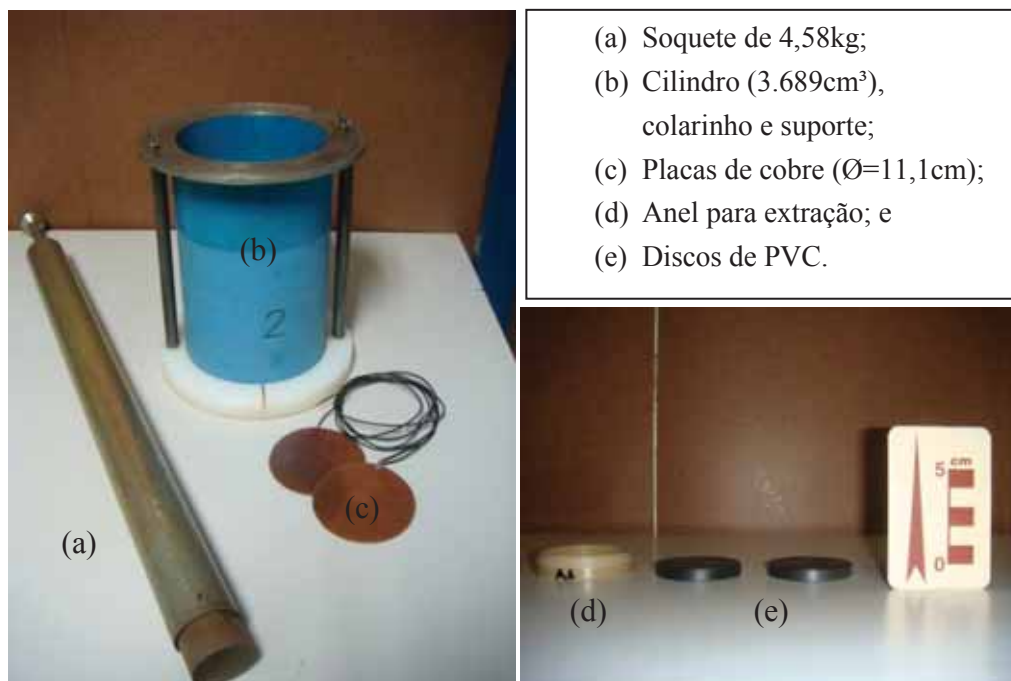


Figura 4. 46 – Equipamentos do ensaio para compactação e extração dos corpos-de-prova.

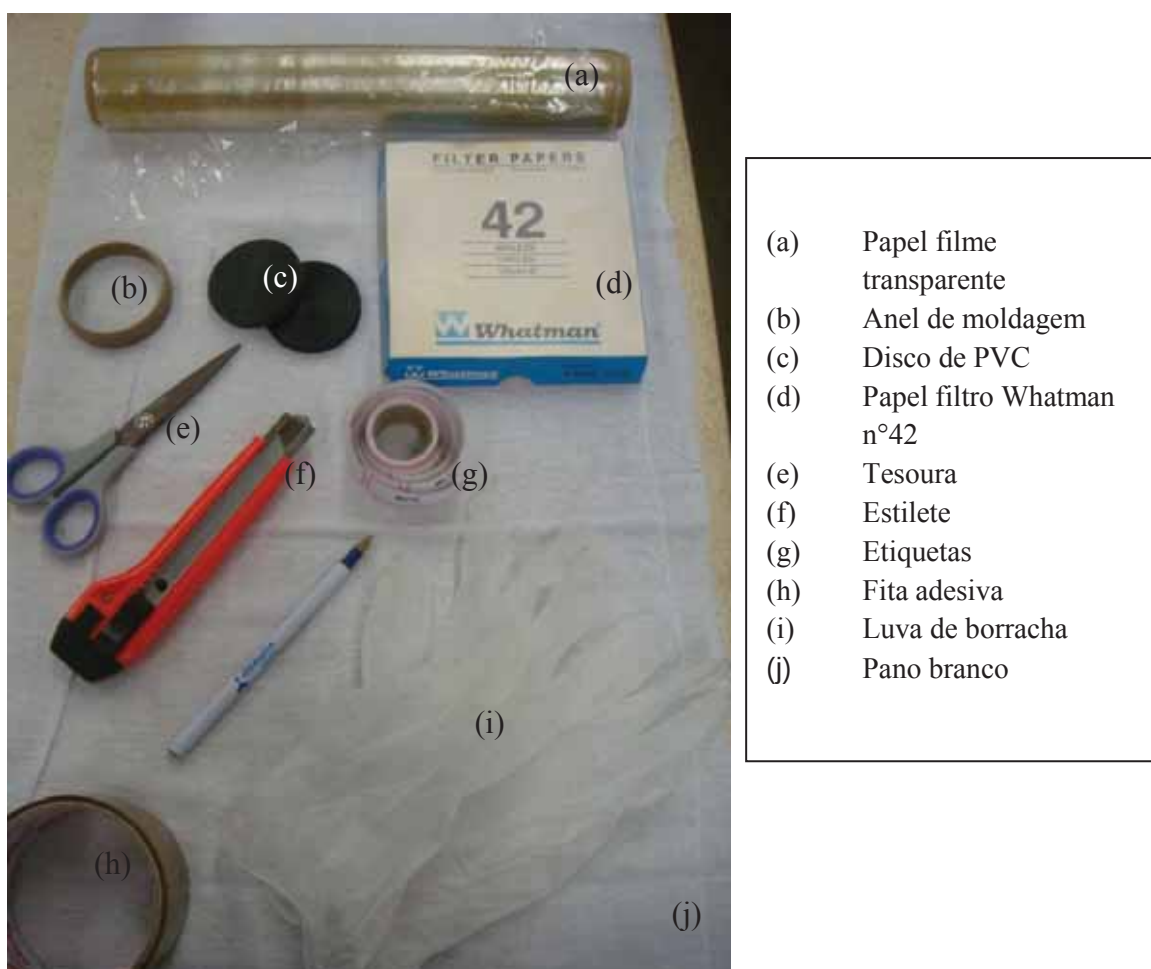


Figura 4. 47 - Alguns equipamentos do ensaio para determinação da curva de retenção de água

❖ Preparação da amostra

A amostra foi previamente preparada seguindo a NBR6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Antes de homogeneizar a amostra, foram obtidas com um condutivímetro de bancada a condutividade elétrica e a correspondente temperatura do fluido de percolação.

A seguir, uma amostra de 8,0kg foi homogeneizada passando pela peneira com abertura de 4,75mm, analogamente ao ensaio de permeabilidade. Escolheu-se o ponto de teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima, determinados pelo ensaio descrito no item 4.4.1, para realizar o presente ensaio.

❖ Procedimentos

No cilindro de 3689cm³, com a amostra homogeneizada compactaram-se em 5 camadas com 21 golpes de soquete cada. Sendo que se retirou uma porção durante a compactação da camada intermediária para a determinação do teor de umidade.

Após o arrasamento com o auxílio de uma régua biselada, mediu-se a massa do conjunto.

Terminada essa primeira etapa, colocou-se uma placa em cada extremidade do cilindro (**Figura 4. 48**) e para garantir um maior contato da placa superior com o solo preencheu-se parte do colarinho com a sobra do solo, pressionando-o levemente com as mãos.



Figura 4. 48 – Posicionamento das placas.

Partindo-se para a segunda etapa, montou-se o circuito ligando-se a fonte aos fios conectados as placas em ambas as extremidades do corpo de prova. Da mesma forma que os outros ensaios, a esse circuito foi inserido um multímetro em série na posição de amperímetro e outro em

paralelo na posição de voltímetro para medir os valores de corrente e voltagem, respectivamente, do solo.

Antes de dar início ao procedimento do ensaio, foram anotadas as temperaturas do solo com o auxílio de um termômetro digital e sua respectiva ponteira.

Para garantir os resultados, os ensaios prosseguiram o mesmo padrão para os valores de RMS e da curva da onda, em 6V para RMS e curva senoidal de 50%. Assim, impondo-se uma frequência de 1000 Hertz foram anotadas as medidas de corrente e voltagem.

Dando continuidade ao ensaio, seguiu-se a metodologia utilizada por Rodrigues (2007) para a determinação da curva de retenção de água, a partir do cilindro compactado moldou-se 21 corpos-de-prova, de 53mm de diâmetro e 13mm de altura em média, seguindo a trajetória de secagem. De forma que, a cada corpo-de-prova moldado determinou-se o teor de umidade, mediu-se a massa e a posicionou sobre uma pedra porosa com intermédio de um papel filtro, este foi recortado de tal formato que fosse maior que a circunferência do anel e menor que o diâmetro da pedra e ainda tivesse um filete como na foto da **Figura 4. 49**.

Na mesma foto, observa-se que esse conjunto foi colocado em uma bandeja e assim as placas porosas foram parcialmente submersas em água destilada e deairada, permanecendo no mínimo durante 24 horas. Enquanto isso se determinou os índices físicos.



Figura 4. 49 – Posicionamento dos anéis para saturação.

Após esse período, retirou-se um dos anéis obtendo deste a massa, as medidas de corrente e voltagem no padrão adotado em todos os ensaios, o teor de umidade e a temperatura.

As demais amostras foram retiradas da bandeja para secagem ao ar, conforme **Figura 4. 50**, sendo pesadas na balança com precisão de 0,0001g periodicamente até atingir a massa prevista.



Figura 4. 50 – Processo de secagem das amostras e pesagem das massas.

Atingida a massa, o corpo-de-prova foi envolvido nas extremidades superior e inferior com o papel de filtro Whatman n° 42 recortados de tal forma que o diâmetro fosse menor que a amostra de solo.

Em seguida, envolveu-se várias vezes a amostra em filme plástico. Para garantir maior contato do solo com o papel filtro, o conjunto foi pressionado com discos de PVC em suas extremidades, novamente envolto em filme plástico e embalado com fita adesiva. (**Figura 4. 51**)



Figura 4. 51 – Proteção dos corpos-de-prova com sua respectiva identificação e armazenados dentro do isopor.

Finalizando essa primeira fase, as amostras foram identificadas com o nome do anel, a data e a hora em que foi embalada. Assim, foram armazenadas numa caixa de isopor durante sete a quinze dias dependendo do teor de umidade teórico, com o intuito de assegurar o equilíbrio de fluxo de umidade entre o solo e o papel filtro.

Os cinco por cento mais úmidos, correspondente aos primeiros pontos, foram desfeitos após sete dias para evitar o surgimento de fungos, os intermediários após dez dias e os mais secos em quinze dias para assegurar que o sistema papel-solo entrasse em equilíbrio. Antes de retirar o filme plástico, montou-se a estrutura observada na **Figura 4. 52**, conforme os outros ensaios, para execução mais ágil, assim os papéis e a amostra foram pesados imediatamente na balança com quatro casas decimais de precisão e mediu-se a corrente e a voltagem transmitida pela amostra em meio ao circuito montado com os mesmos padrões anteriormente adotados. (**Figura 4. 53(a)**) Também se anotou o valor da temperatura da amostra (**Figura 4. 53(b)**) e para determinar o teor de umidade foi levada para estufa.



Figura 4. 52 – Estrutura montada para o ensaio de aquisição da resistividade em conjunto com a sucção matricial.



Figura 4. 53 – (a)Aquisição da corrente e voltagem e (b) medida da temperatura no corpo-de-prova.

Para medir a massa dos papéis secos alguns cuidados foram tomados para evitar a sua exposição ao meio, pois são muito suscetíveis a absorção de umidade. Inicialmente, colocou-se um pano branco na estufa para retirada da umidade presente neste, a seguir introduziu-o no recipiente plástico e assim as cápsulas contendo os papéis foram conduzidos no trajeto da estufa até a balança em seu interior, conforme **Figura 4. 54**.



Figura 4. 54 – Recipiente plástico com a cápsula acomodada.

Pela umidade do papel calculou-se a sucção matricial por meio das equações 36 e 37 de correlação de Chandler et al. (1992). Assim, obteve-se a curva de retenção de água no solo com o par de valores formado pela sucção matricial com o teor de umidade do solo.

$$s = 10^{6,05-2,48.\log w_{\text{papel}}} \quad W_{\text{papel}} \geq 47\% \quad (21)$$

$$s = 10^{4,84-0,0622.w_{\text{papel}}} \quad W_{\text{papel}} < 47\% \quad (22)$$

Segundo Rodrigues (2007) o uso dessa equação oferece maior benefício em relação às demais, uma vez que o resultado da sucção é dado em kPa.

Para relacionar com a resistividade elétrica do solo foram calculados para cada par de valores de corrente e voltagem: a sua respectiva resistência pela equação 02, a sua resistividade pela equação 03 e a sua condutividade pela equação 01.

$$R = \frac{V}{I} \quad (02)$$

$$\rho = \frac{R.A}{L} \quad (03)$$

$$\text{Condutividade} = \frac{10000}{\rho} \quad (01)$$

Os ensaios foram realizados tanto com água destilada, como com água de abastecimento.

5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

5.1 Variação do teor de salinidade do fluido

Primeiramente, como Aquino (2010), fez-se uma análise avaliando exclusivamente a concentração eletrolítica do fluido, uma vez que essa foi a base de todo o estudo aqui realizado. Observa-se pela **Figura 5. 1** que a condutividade aumenta à medida que se aumenta a quantidade de íons dissolvidos, conforme a literatura.

Para as soluções escolhidas, essa variação apresentou comportamento linear. Porém, não foi possível realizar uma análise para a água de abastecimento em função da concentração de NaCl, visto que não foi realizada uma análise química fornecendo os seus elementos e para as soluções ensaiadas utilizou-se água destilada.

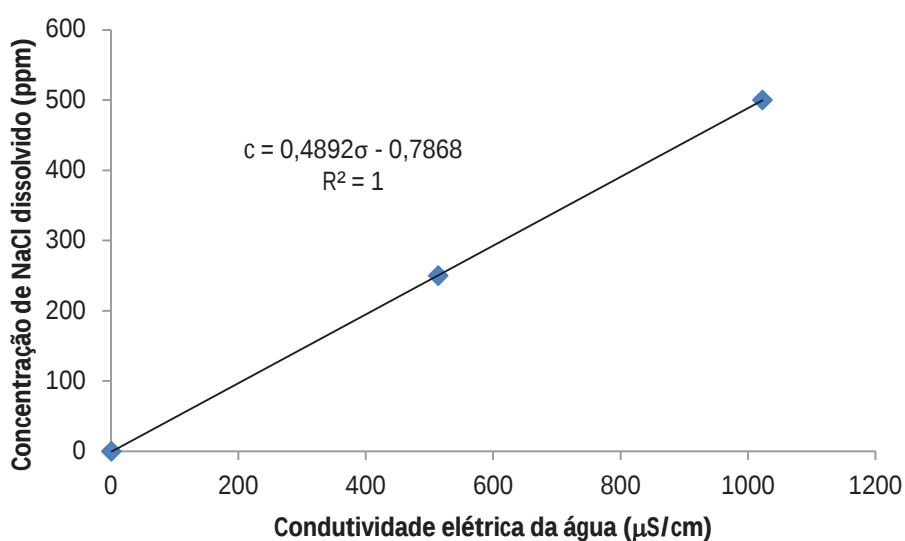


Figura 5. 1 – Relação da condutividade elétrica com a concentração de NaCl dissolvido.

5.2 Ensaios de Compactação

Na sequência serão apresentadas as análises realizadas para o Solo Bauru e para o Solo Piracicaba separadamente. Em média, os ensaios de compactação com o Solo Bauru resultaram na curva semelhante ao da **Figura 5. 2**. Assim correlacionando-os com os valores de resistividade elétrica contidos na **Tabela 5. 1**, se obtém as curvas da **Figura 5. 3**.

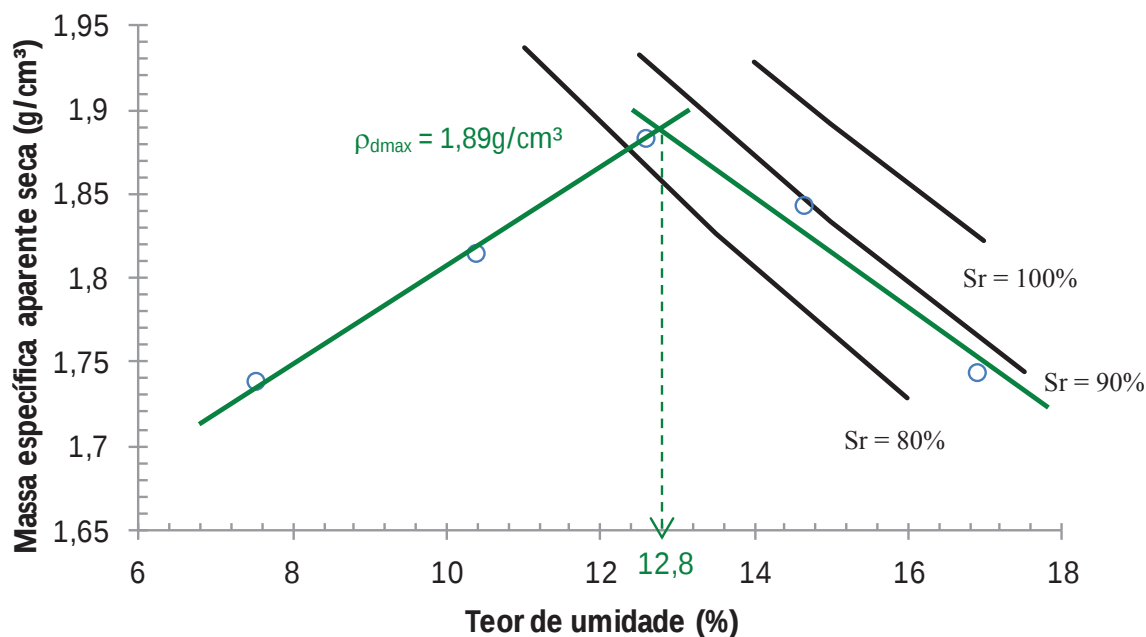


Figura 5. 2 – Curva de compactação dos ensaios com o mini-cilindro independente da solução no Solo Bauru

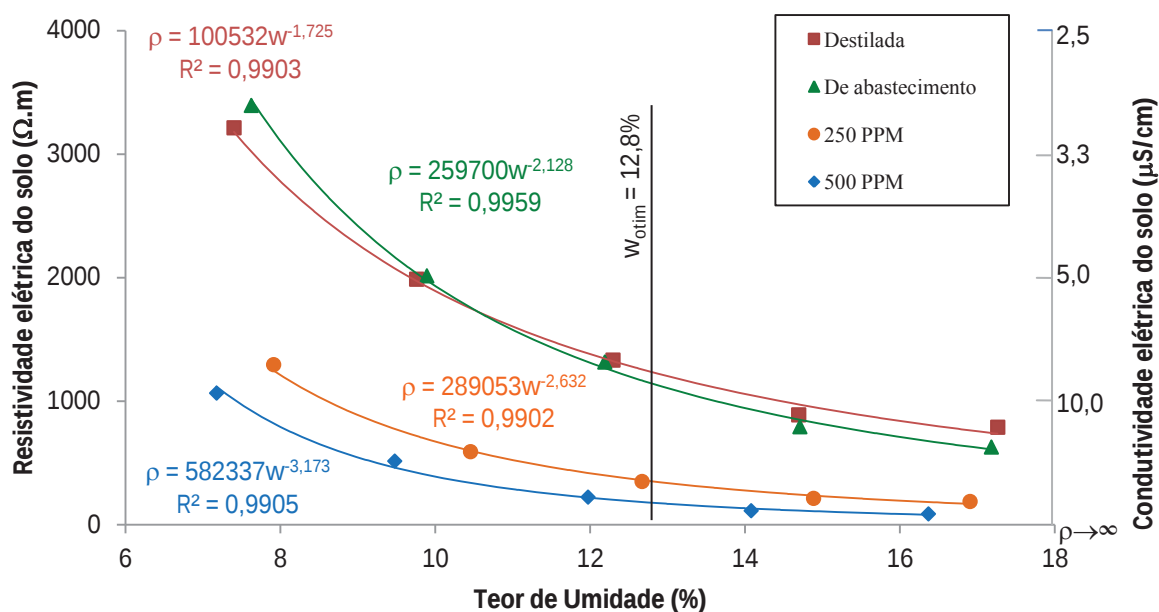


Figura 5. 3 – Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o Solo Bauru.

Tabela 5. 1 – Valores médios obtidos nos ensaios de compactação variando-se o teor de salinidade do fluido.

Amostra	Fluido	w (%)	ρ_b ($\Omega.m$)	e	Sr (%)
Solo Bauru	Água destilada	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	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	91,00
		17,2	629	0,51	88,35
	250 ppm	7,9	1296	0,53	39,91
		10,5	592	0,45	61,97
		12,7	350	0,41	82,10
		14,9	214	0,44	90,25
		16,9	189	0,51	88,54
	500 ppm	7,2	1066	0,57	33,63
		9,5	515	0,47	53,22
		12,0	224	0,42	75,71
		14,1	114	0,41	91,11
		16,4	88	0,48	90,23
Solo Piracicaba	Água destilada	20,0	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	20,0	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	20,4	138	0,91	64,36
		22,4	90	0,83	77,74
		24,9	62	0,84	85,32
		27,0	54	0,87	89,37
		29,3	49	0,92	90,99
	500 ppm	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
		28,0	31	0,89	90,71

No entanto, com o Solo Piracicaba, as curvas com a adição de NaCl na água utilizada para homogeneização apresentaram um pequeno deslocamento em relação as curvas referentes a água destilada e a de abastecimento, como observa-se na **Figura 5. 4**. E analogamente, correlacionou-se as medidas de resistividade conforme **Figura 5. 5**.

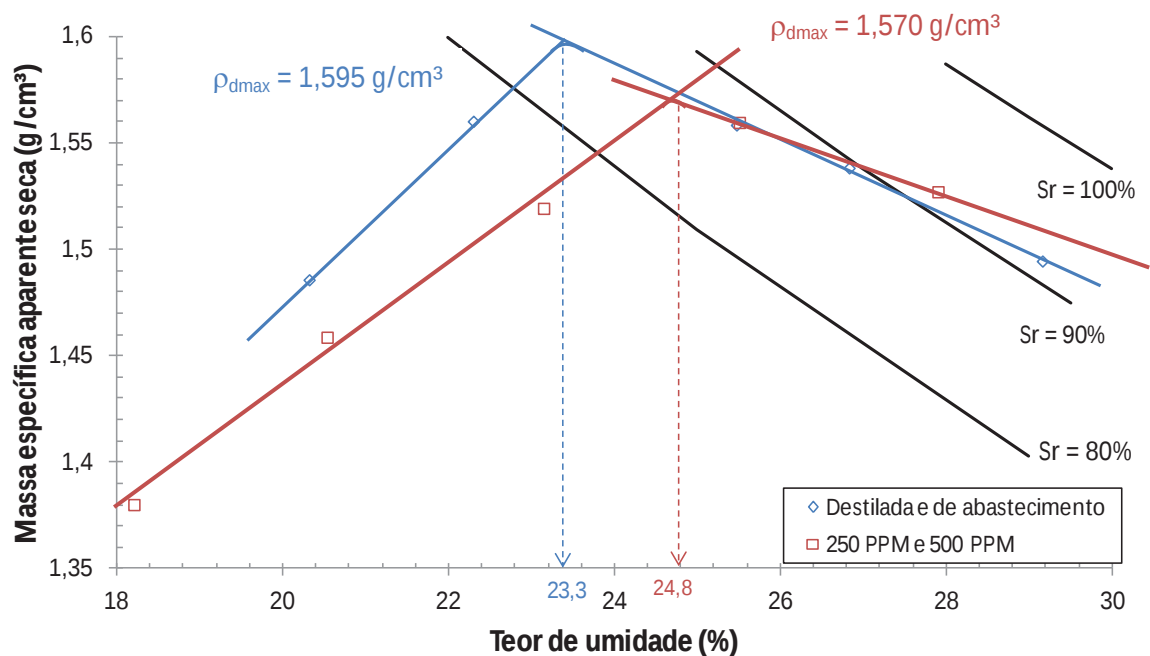


Figura 5. 4 – Curvas de compactação dos ensaios com o mini-cilindro no Solo Piracicaba

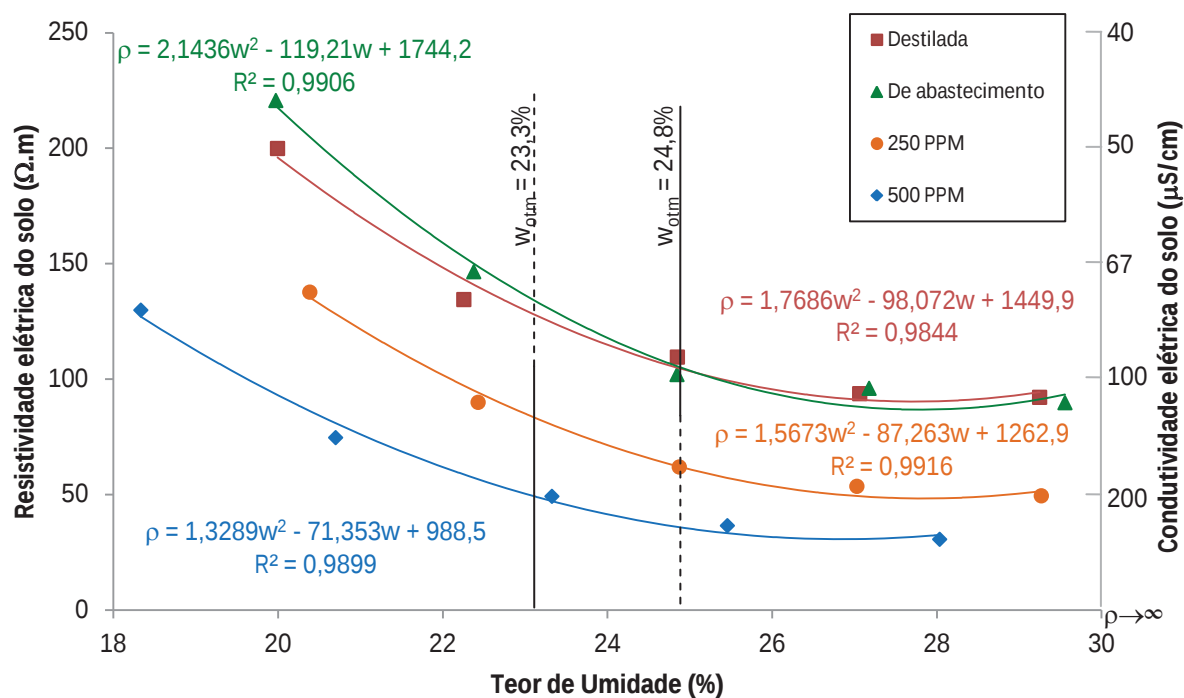


Figura 5. 5 - Curvas da variação da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação para o Solo Piracicaba.

Esse deslocamento observado na curva de compactação devido a variação da solução utilizada na homogeneização poderia estar relacionado com a capacidade de troca catiônica da argila e a adsorção das propriedades elétricas das partículas dos argilominerais presentes na amostra com o NaCl diluído no fluido de homogeneização, visto que no Solo Piracicaba é composto em sua maioria por argila.

De forma geral, observa-se o mesmo comportamento da resistividade em relação ao teor de umidade de compactação independentemente da solução, ou seja, aumentando-se o teor de umidade no momento da compactação a resistividade diminui e nas concentrações mais elevadas observa-se uma tendência a um ponto de equilíbrio da resistividade.

Pelos gráficos das **Figura 5. 3** e **Figura 5. 5** pode-se observar ainda que nos teores de umidade abaixo da ótima houve grande variação nos valores de resistividade do solo, esse resultado pode ter sido afetado pelo fato de existir maior quantidade de ar nos vazios. Porém, pode-se notar que a curva permanece descendente com tendência a um valor constante da medida de resistividade após o teor de umidade ótimo.

No entanto, variando-se o teor de umidade no momento da compactação surgem outras variáveis, como: índice de vazios, porosidade, grau de saturação e massa específica aparente seca. Sendo assim, analisando os pontos correspondentes a mesma umidade, massa específica aparente seca e índices físicos próximos, com o aumento da concentração de NaCl na solução, conforme **Figura 5. 6** e **Figura 5. 7**, observou-se que a resistividade diminui.

Nota-se que há uma tendência do aumento da resistividade com o aumento do índice de vazios “e” ao caminhar para o ramo seco da curva de compactação.

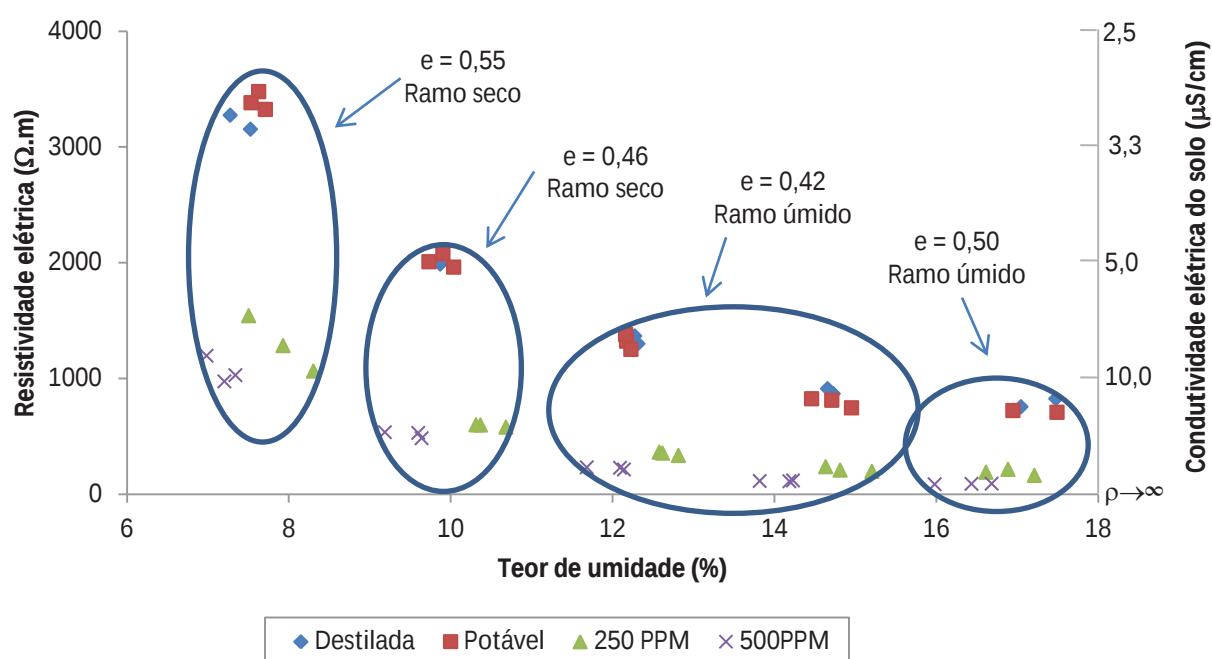


Figura 5. 6 – Variação da resistividade elétrica versus teor de umidade considerando o índice de vazios do Solo Bauru.

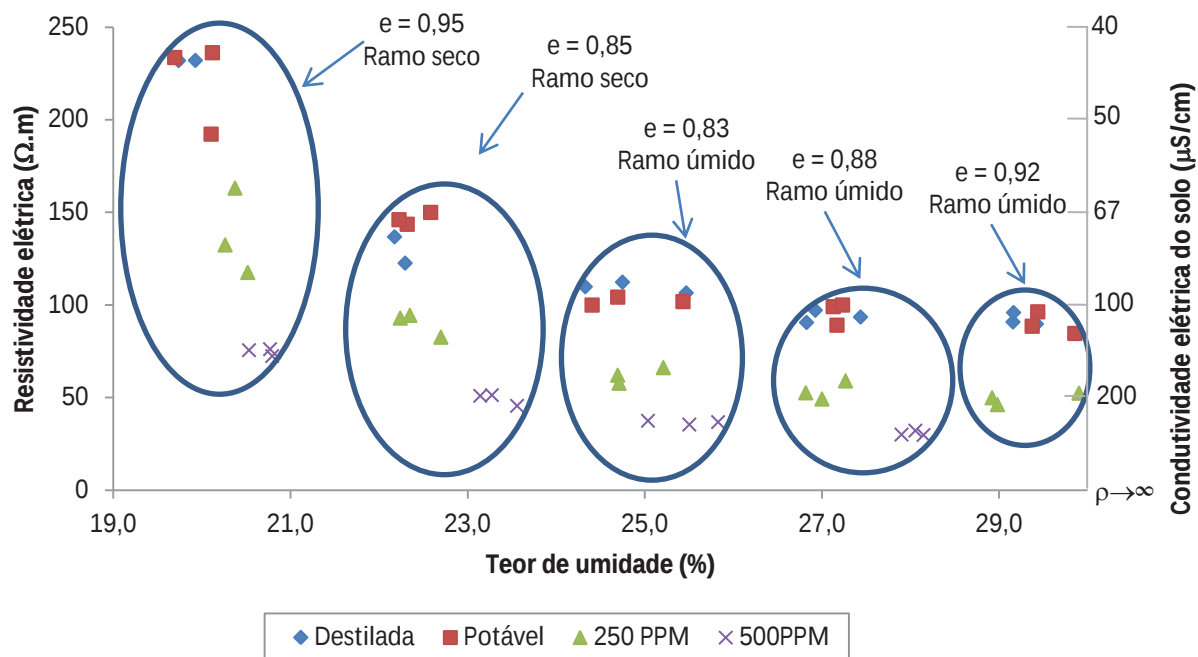


Figura 5. 7 - Variação da resistividade elétrica versus teor de umidade considerando o índice de vazios do Solo Piracicaba.

Porém, aumentando-se “e” no ramo úmido da mesma curva observa-se uma tendência oposta, ou seja, a resistividade diminui tendendo a um equilíbrio devido aos vazios do solo estarem preenchidos por água em vez de ar como no ramo seco. Essa tendência pode ser confirmada pela relação da resistividade com o grau de saturação, conforme **Figura 5. 8** e **Figura 5. 9**.

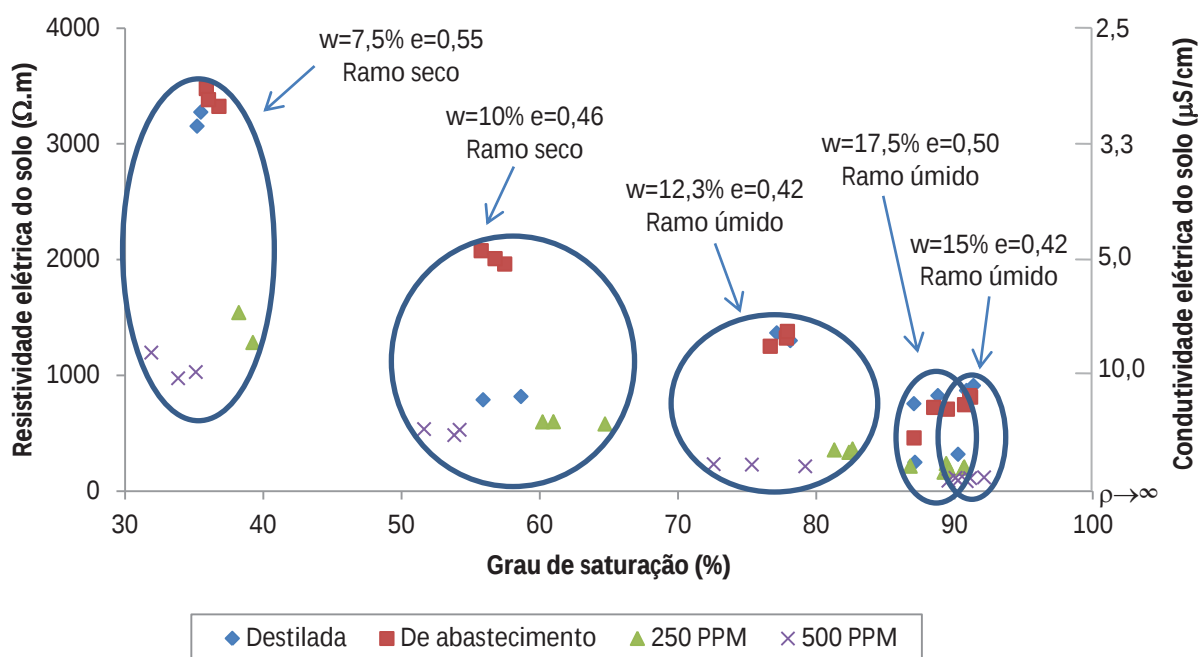


Figura 5. 8 – Variação da resistividade em relação ao grau de saturação em cada ponto da curva de compactação do Solo Bauru.

Nota-se em ambos os ensaios que a resistividade atinge o seu equilíbrio no ramo úmido da curva de compactação, ou seja, quando o grau de saturação está acima de 80%. Sendo que no Solo Piracicaba esse comportamento se apresenta mais nítido em relação ao Solo Bauru.

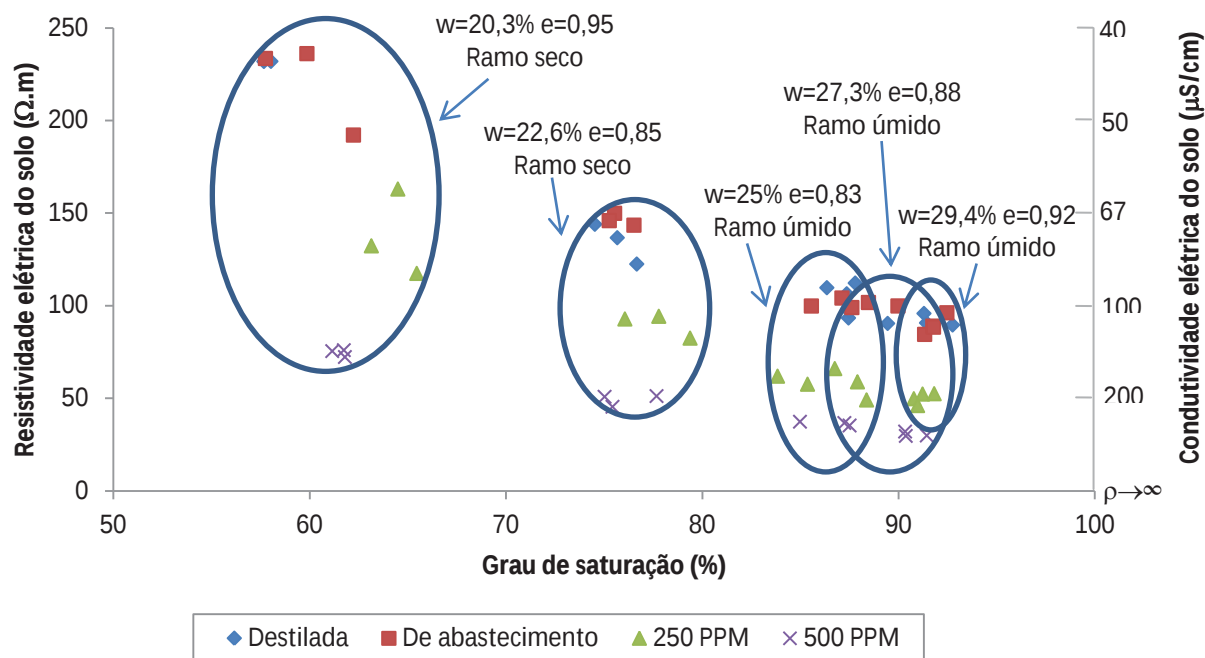


Figura 5. 9 - Variação da resistividade em relação ao grau de saturação em cada ponto da curva de compactação do Solo Piracicaba.

5.3 Ensaios de Permeabilidade

Os valores para o coeficiente de permeabilidade obtido pelo ensaio de permeabilidade a carga variável foram próximos embora tenham sido percolados com diferentes soluções, conforme **Tabela 5. 2**.

Tabela 5. 2 – Valores do coeficiente de permeabilidade para os diferentes fluidos a 20°C.

Amostra\Fluído	Destilada	250 ppm	500 ppm	De abastecimento
K (Solo Bauru)	$1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1,7 \cdot 10^{-8}$ m/s	$2,1 \cdot 10^{-8}$ m/s	$3,0 \cdot 10^{-8}$ m/s
K (Solo Piracicaba)	$3,7 \cdot 10^{-10}$ m/s	$3,7 \cdot 10^{-10}$ m/s	$3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s	$4,2 \cdot 10^{-10}$ m/s

Segundo Casagrande e Fadum (*apud* Caputo, 1988) para o coeficiente de permeabilidade entre 10^{-5} e 10^{-9} m/s abrangem as areias muito finas e siltes, e acima de 10^{-9} m/s as argilas. Logo, os resultados obtidos são confirmados com a granulometria de ambas as amostras de solo.

Assim como no ensaio de compactação, mediu-se a corrente e a voltagem através do solo por meio das placas de cobre. Neste ensaio as medidas foram tomadas duas vezes: uma imediatamente após a compactação e a outra após a percolação do fluido. Com esses dados, calculou-se a resistividade e a condutividade elétrica do Solo Bauru na **Tabela 5. 3** e do Solo Piracicaba na **Tabela 5. 4**. Esse ensaio teve como principal objetivo avaliar o grau de saturação do corpo-de-prova, visto que todas as outras variáveis permanecem praticamente constantes.

Tabela 5. 3 – Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para o Solo Bauru.

Fluído		w (%)	Resistividade (Ω .m)	Condutividade (μ S/cm)	γ_d (KN/m ³)	e	n (%)	Sr (%)
Destilada	Antes	12,8	939	10,6	18,69	0,41	29,3	81,5
	Depois	13,9	652	15,3	18,62	0,41	29,5	87,9
	Antes	12,7	924	10,8	18,51	0,42	29,9	78,7
	Depois	13,3	719	13,8	18,52	0,42	29,9	82,5
	Antes	12,3	1005	9,9	18,65	0,41	29,4	78,1
	Depois	13,5	669	14,9	18,62	0,41	29,5	85,1
250 PPM	Antes	12,5	345	28,9	18,45	0,43	30,2	76,6
	Depois	14,5	109	91,1	18,46	0,43	30,1	88,7
	Antes	12,9	344	29,0	18,61	0,42	29,5	81,2
	Depois	13,9	183	54,6	18,62	0,41	29,5	87,5
	Antes	12,8	380	26,2	18,47	0,43	30,1	78,5
	Depois	13,9	255	39,1	18,48	0,43	30,0	85,4
500 PPM	Antes	12,0	193	51,6	18,38	0,43	30,4	72,4
	Depois	14,4	54	181,9	18,39	0,43	30,4	87,2
	Antes	12,8	195	51,0	18,70	0,41	29,2	82,1
	Depois	14	90	111,0	18,68	0,41	29,3	89,4
	Antes	12,3	167	59,7	18,50	0,42	30,0	76,2
	Depois	14	68	146,7	18,49	0,43	30,0	86,3
De abastecimento	Antes	12,4	549	18,2	18,42	0,43	30,3	75,5
	Depois	14,3	471	21,1	18,41	0,43	30,3	86,8
	Antes	12,2	520	19,2	18,35	0,44	30,5	73,0
	Depois	14,6	528	18,9	18,30	0,44	30,7	86,8
	Antes	12,1	666	15,0	18,46	0,43	30,1	74,3
	Depois	14	731	13,6	18,45	0,43	30,1	85,5

Tabela 5. 4 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para o Solo Piracicaba.

Fluído		w (%)	Resistividade (Ω .m)	Condutividade (μ S/cm)	γ_d (KN/m ³)	e	n (%)	Sr (%)
Destilada	Antes	24,8	84	119,0	15,72	0,82	45,1	86,9
	Depois	25,6	53	190,5	15,78	0,82	44,9	90,4
250 PPM	Antes	25,5	79	127,2	14,93	0,92	47,9	79,7
	Depois	28,4	37	272,1	14,90	0,92	47,9	88,5
500 PPM	Antes	24,6	49	205,8	15,51	0,85	45,8	83,6
	Depois	26,8	25	396,4	15,45	0,85	46,0	90,2
De abastecimento	Antes	24,6	10.223	96,4	15,49	0,85	45,9	83,3
	Depois	26,3	3.897	252,9	15,62	0,84	45,5	90,7

Os ensaios com o Solo Piracicaba foram executados sem o critério da repetibilidade devido ao tempo despendido para atingir a saturação do corpo-de-prova ser extenso pelo método adotado. No entanto, observou-se que o comportamento da resistividade apresenta-se de forma análoga ao Solo Bauru.

Após a percolação do fluido, com o aumento do grau de saturação, diminuiu-se a resistividade, ou seja, quanto maior a quantidade de água nos vazios há um aumento da condutividade elétrica do meio. Porém, o ensaio realizado com água de abastecimento no Solo Bauru apresentou comportamento diferenciado dos demais, reforçando ainda mais a necessidade de realizar uma análise química da água, pois esta pode apresentar elementos que reagem com o solo proporcionando essa mudança.

A variação do comportamento da resistividade em função do grau de saturação pode ser melhor analisada nos gráficos das **Figura 5. 10** e **Figura 5. 11**.

Analizando a influência do tipo de solo e da concentração de NaCl presente no fluido de percolação no comportamento da resistividade elétrica, exclusivamente para as amostras em questão, pode-se dizer que o tipo de solo apresenta maior influência nessa medida, visto que aumentando-se a concentração de partículas de argila houve uma queda de aproximadamente 10 vezes no valor da resistividade independente do fluido. Enquanto que, para uma mesma amostra, aumentando-se a concentração de NaCl no fluido a variação na medida de resistividade foi menor.

Pelos gráficos das **Figura 5. 10** e **Figura 5. 11** pode-se observar que a resistividade tende a diminuir com o aumento do grau de saturação, no entanto durante os ensaios encontraram-se dificuldades em garantir o grau de saturação em 100% pelo método adotado, como se observa pelos dados dos gráficos depois da percolação a variação numa faixa de 85 a 90%. Uma hipótese poderia estar relacionada aos dias em que o corpo-de-prova permaneceu envolto ao fluxo da solução, visto que o tempo em dias variou pela demora em obter a saturação e em alguns problemas operacionais.

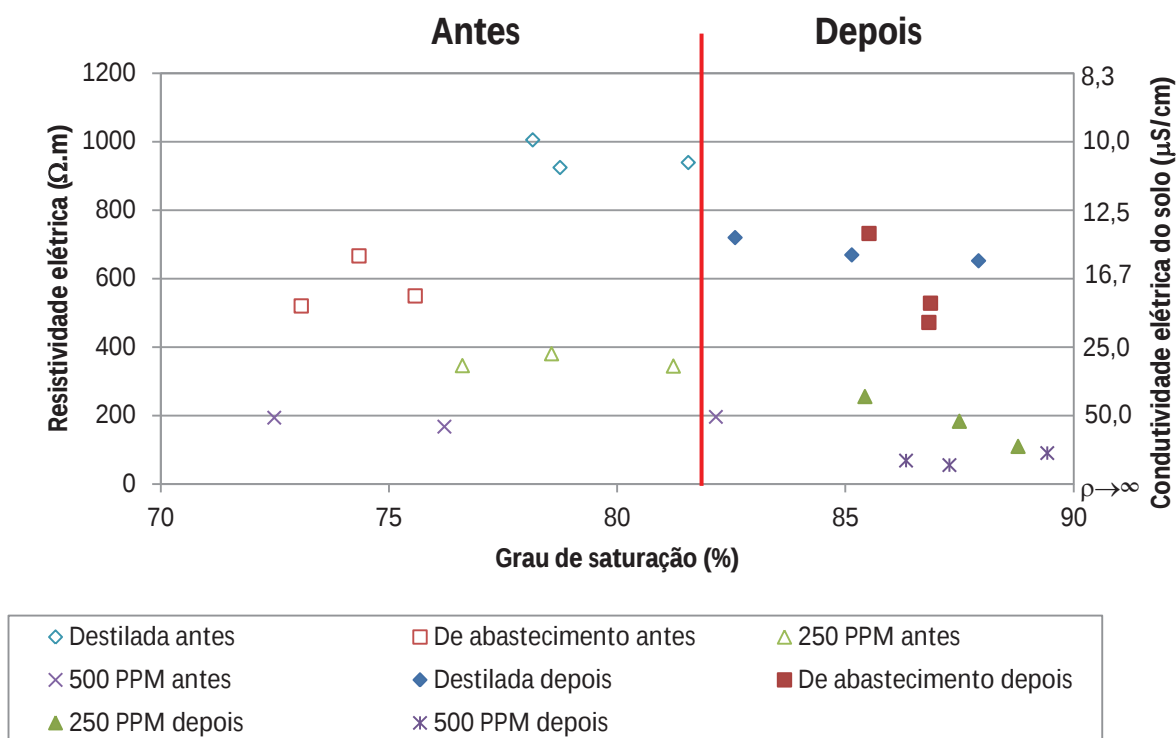


Figura 5. 10 – Variação da resistividade elétrica em função do grau de saturação antes e após o ensaio de permeabilidade no Solo Bauru.

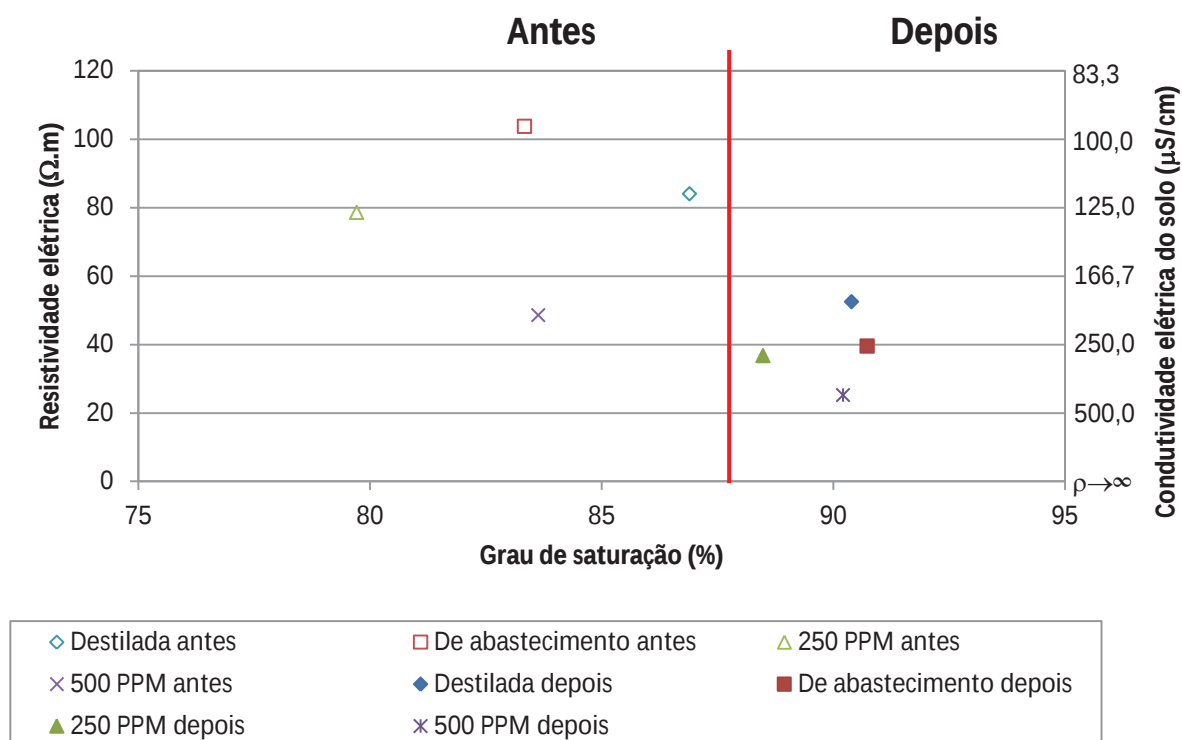


Figura 5. 11 - Variação da resistividade elétrica em função do grau de saturação antes e após o ensaio de permeabilidade no Solo Piracicaba.

Dessa forma, elaborou-se o gráfico da **Figura 5. 12** apenas com os resultados obtidos com o Solo Bauru.

Esperava-se obter valores menores para a resistividade, ou seja, maior condutividade elétrica, com o aumento do período a qual permaneceu com a percolação do fluido. No entanto, os valores de resistividade elétrica apresentados pela percolação da água de abastecimento aumentaram com os dias, uma explicação para esse fato seria que a água estaria carregando os minerais presentes na amostra para fora segundo Boszczowski (2008). Contudo, para uma melhor análise necessita-se de mais pontos.

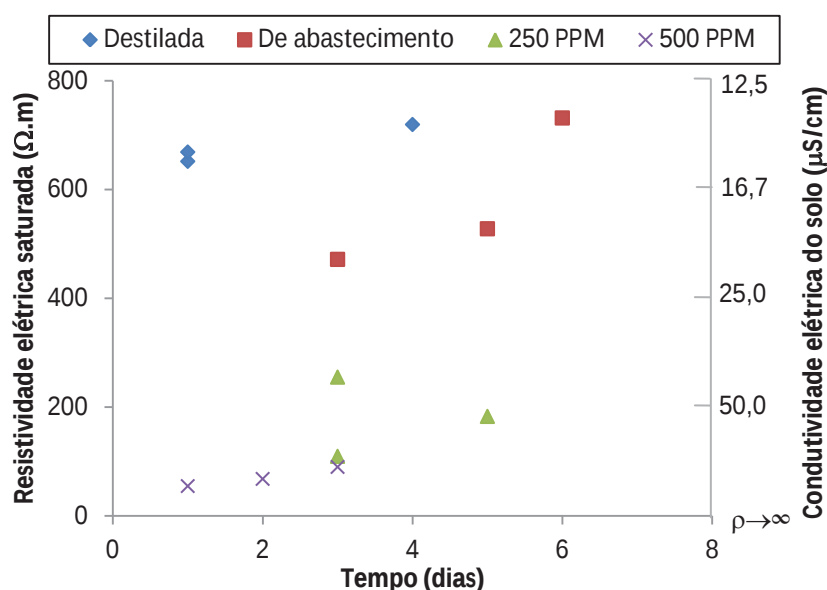


Figura 5. 12 – Variação da resistividade em função do tempo de fluxo da solução.

Uma relação que se demonstrou interessante foi a relação da resistividade elétrica do solo saturado com a resistividade da solução a qual foi submetido à percolação, denominado fator de formação (FF). Nas **Tabela 5. 5** e **Tabela 5. 6** estão apresentados os valores na ordem: resistividade elétrica do solo saturado (ρ_{sat}), condutividade elétrica da água (C_w), resistividade elétrica da água no reservatório antes da percolação (ρ_w), fator de formação (FF) e a sua média ($\text{FF}_{\text{médio}}$) para os Solos Bauru e Piracicaba, respectivamente.

Quando o fluido possui condutividade muito baixa como a água destilada, a resistividade do solo é inibida pela resistividade do líquido no que diz respeito aos valores obtidos para o fator de formação. Porém, com o aumento da condutividade do fluido a resistividade por sua vez diminuiu e o fator de formação para a amostra do Solo Bauru permaneceu em torno de 7,5 e do Solo Piracicaba em 2.

Tabela 5. 5 – Fator de formação para o Solo Bauru.

	ρ_{sat} ($\Omega.m$)	C_w ($\mu S/cm$)	ρ_w ($\Omega.m$)	FF	FF _{médio}
Destilada	652,08	0,98	10204,08	0,06	0,07
	719,82	1	10000,00	0,07	
	669,21	1,02	9803,92	0,07	
De abastecimento	471,82	133,5	74,91	6,30	7,71
	528,12	133,8	74,74	7,07	
	731,85	133,4	74,96	9,76	
250 PPM	109,69	522	19,16	5,73	7,67
	183,09	525	19,05	9,61	
	255,34	527	18,98	13,46*	
500 PPM	54,95	1029	9,72	5,65	7,29
	90,09	1025	9,76	9,23	
	68,13	1023	9,78	6,97	

Obs.: *valor desconsiderado

Tabela 5. 6 - Fator de formação para o Solo Piracicaba.

	ρ_{sat} ($\Omega.m$)	C_w ($\mu S/cm$)	ρ_w ($\Omega.m$)	FF
Destilada	52,50	0,98	10204,08	0,01
De abastecimento	39,55	133,5	74,91	0,53
250 PPM	36,76	522	19,16	1,92
500 PPM	25,22	1029	9,72	2,60

5.4 Ensaios de Sucção Matricial

Por meio da técnica do papel filtro na trajetória de secagem, obtiveram-se as curvas de retenção de água no Solo Bauru e no Solo Piracicaba apresentadas nas **Figura 5. 13** e **Figura 5. 14**.

Os ensaios foram realizados apenas com a água destilada e a de abastecimento, pois este ensaio demanda um período relativamente longo para concluí-lo, em torno de um mês para cada curva. Pelo mesmo motivo, garantiu-se a repetibilidade do ensaio apenas com a água destilada realizando-o três vezes. No entanto para proporcionar maior confiabilidade nos dados foram utilizados 20 corpos-de-prova, gerando em maior número de pontos para a curva.

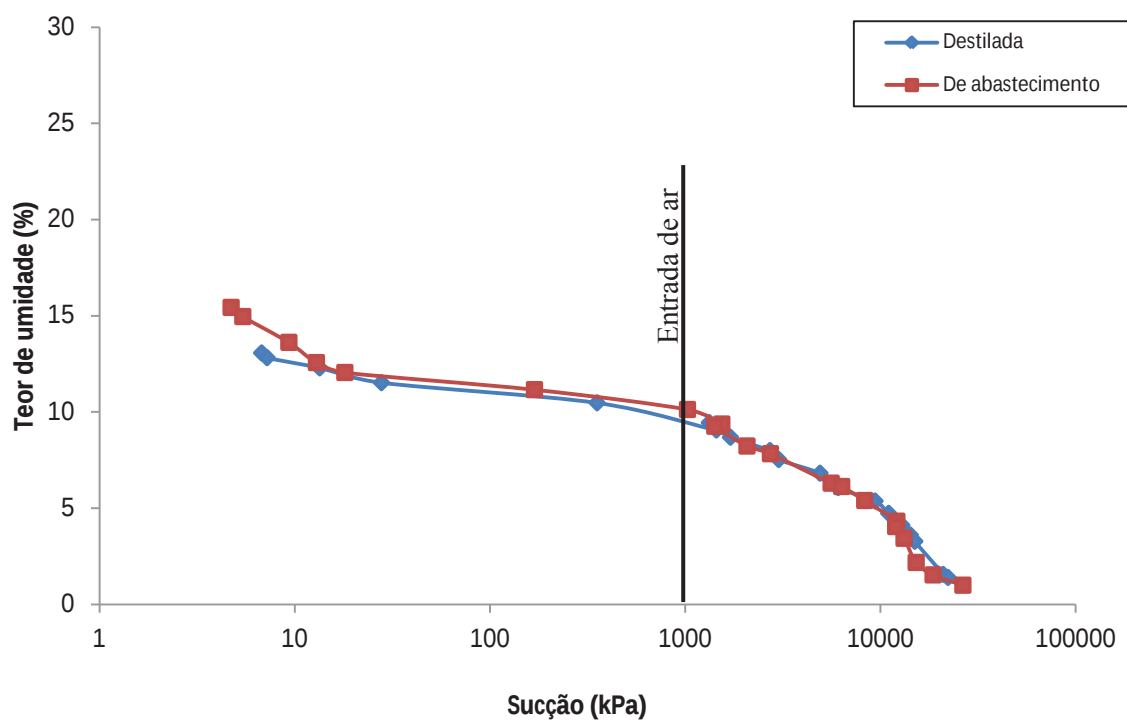


Figura 5. 13 – Curvas de retenção de água no Solo Bauru.

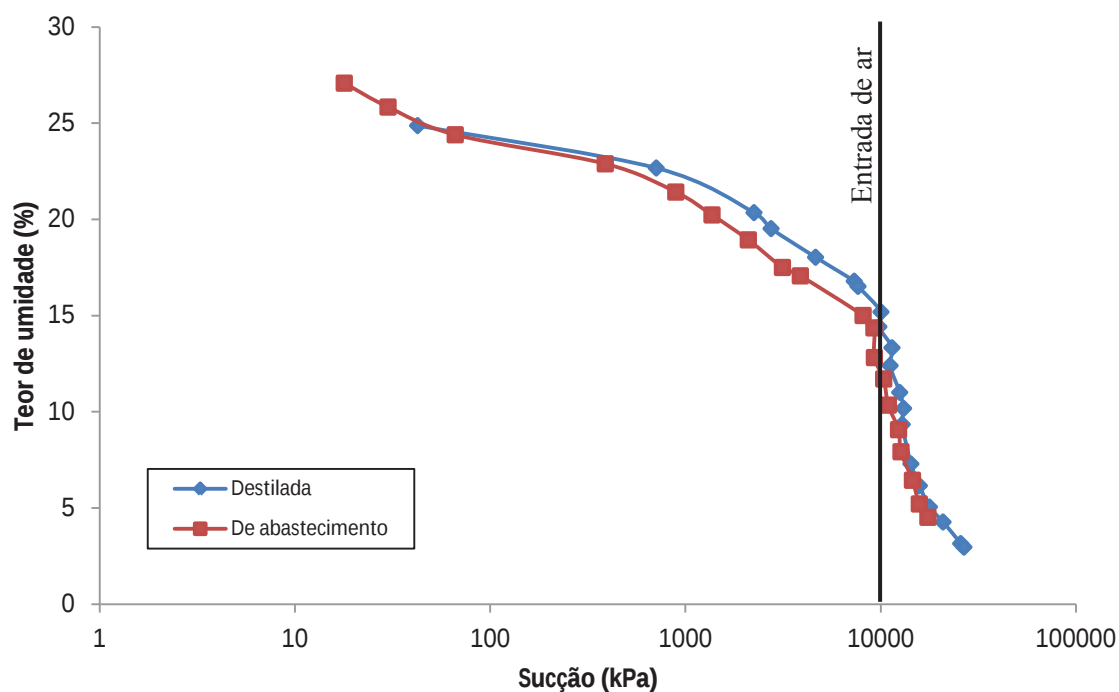


Figura 5. 14 - Curvas de retenção de água no Solo Piracicaba.

Verifica-se pelas curvas que a retenção de água tanto para o Solo Bauru como para o Solo Piracicaba seguem a mesma trajetória tanto com água destilada como com água de abastecimento. Sendo que a primeira entrada de ar no Solo Bauru ocorre quando a sucção matricial atinge 1000kPa e no Solo Piracicaba quando atinge 10.000kPa.

Na tentativa de se obter um valor para o parâmetro “b” da equação de Archie, estudou-se a relação entre a resistividade do solo sobre a resistividade do solo saturado e o grau de saturação pela equação 21 do capítulo 3. No entanto, utilizando essa equação no Solo Bauru os coeficientes de determinação foram relativamente baixos, conforme se pode verificar nos gráficos apresentados na **Figura 5. 15**. Ajustando-se uma nova reta para essa relação (**Figura 5. 16**) ambos os coeficientes de determinação expressam valores próximos de 1, porém não é possível extrair o valor de b da Lei de Archie.

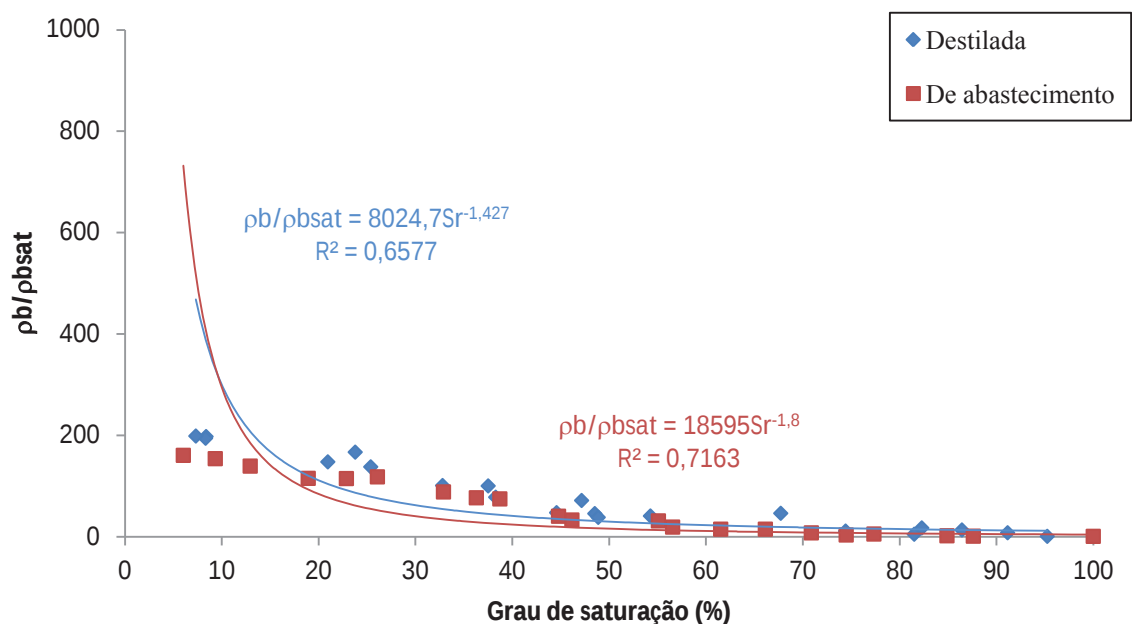


Figura 5. 15 – Tentativa de obtenção do parâmetro “b” da equação de Archie no Solo Bauru.

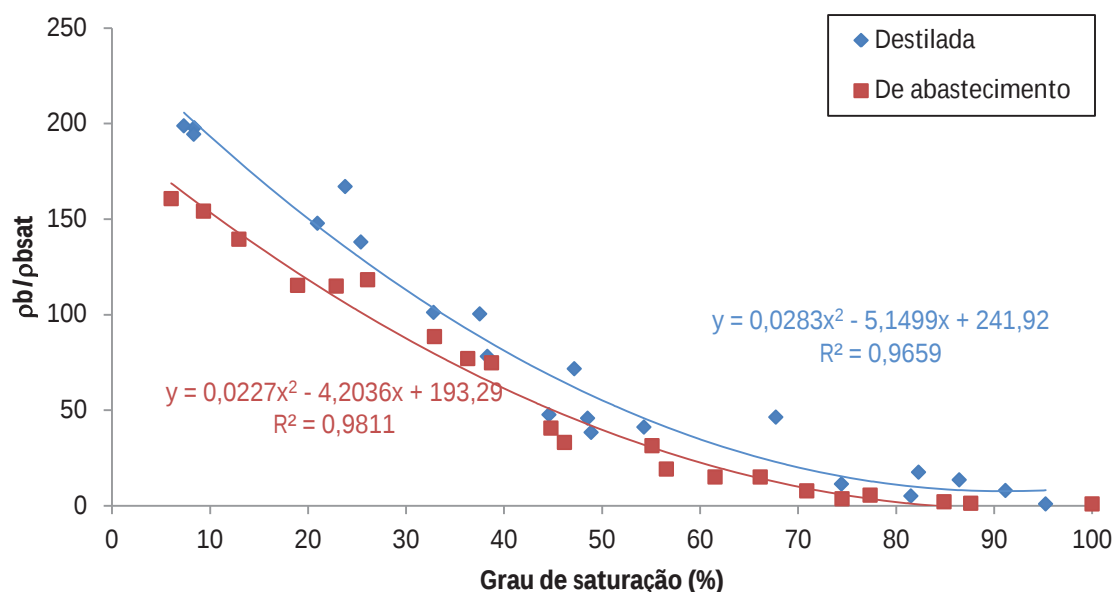


Figura 5. 16 – Nova equação para a tentativa de obter o parâmetro “b” da Lei de Archie para o Solo Bauru.

Utilizando o mesmo recurso para o Solo Piracicaba, embora os coeficientes de determinação não tenham sido baixos, conforme se pode verificar nos gráficos apresentados na **Figura 5. 17**, optou-se por encontrar uma curva que melhor se ajuste aos pontos. A nova curva possui coeficientes de determinação próximos de 1, porém não é possível extrair o valor de “b” da Lei de Archie, pois é expressa por uma função polinomial, vide **Figura 5. 18**.

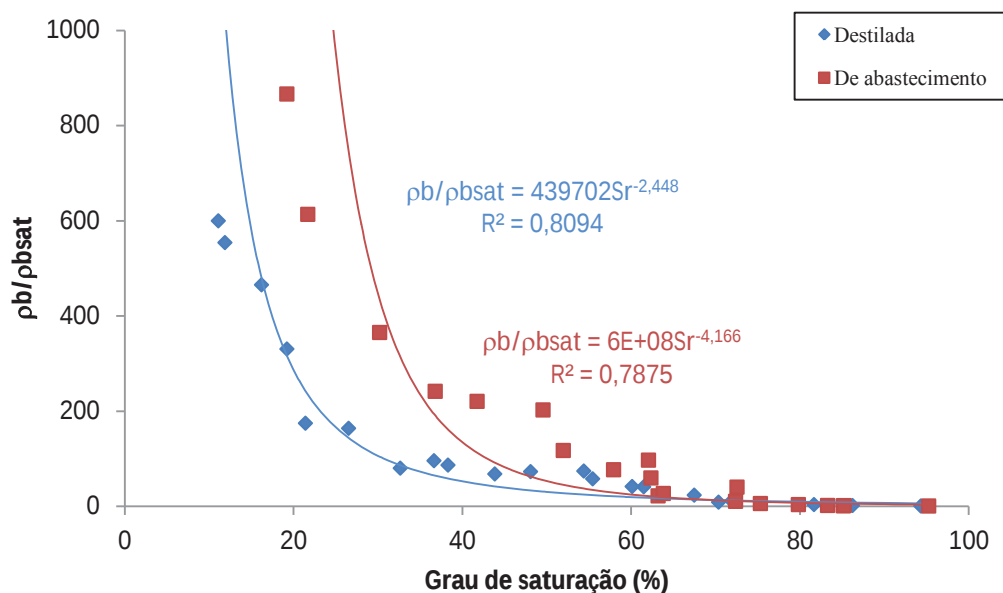


Figura 5. 17 - Tentativa de obtenção do parâmetro “b” da equação de Archie no Solo Piracicaba.

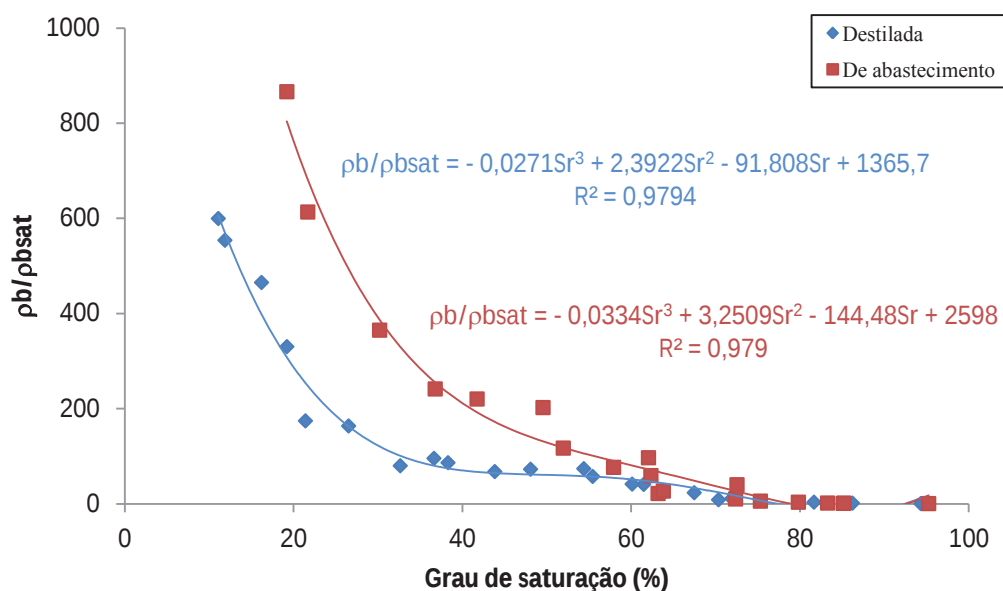


Figura 5. 18 - Nova equação para a tentativa de obter o parâmetro “b” da Lei de Archie para o Solo Piracicaba.

Esses gráficos apresentados nas **Figura 5. 13** a **Figura 5. 18** mostraram uma boa relação controlando o índice de vazios, as relações entre teor de umidade, grau de saturação e sucção.

Relacionando-se o grau de saturação do solo diretamente com a sua respectiva medida da resistividade elétrica observou-se a formação de uma curva, assim ao invés de determinar cada parâmetro (a , b e m) da Lei de Archie separadamente, ajustou-se a equação nos pontos conforme os gráficos da **Figura 5. 19** e **Figura 5. 20** para o Solo Bauru. Esse ajuste tomou como ponto de partida os valores encontrados na bibliografia, ou seja, com “ a ” igual a 1; “ b ” entre 1,0 e 2,5; e “ m ” em torno de 1,5 para as areias.

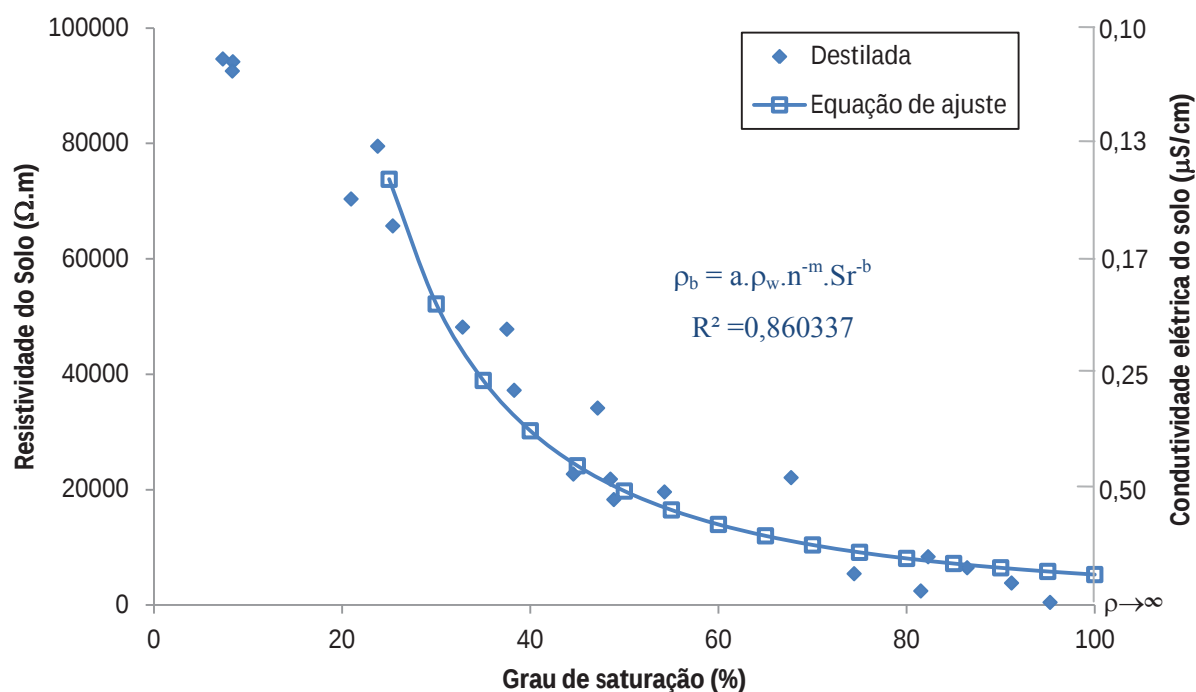


Figura 5. 19 – Ajuste da Lei de Archie no Solo Bauru para a água destilada.

Analogamente, ajustou-se a Lei de Archie nos pontos obtidos com o Solo Piracicaba conforme os gráficos das **Figura 5. 21** e **Figura 5. 22**.

Dessa forma, chegou-se aos valores dispostos na **Tabela 5. 7** para ambas as amostras, pela qual se observou que o valor correspondente ao parâmetro “ a ” foi o que apresentou maior dispersão em relação ao dado inicial, o que era esperado devido ao solo ser compactado. Mas como ambos os ensaios foram realizados compactando-se a amostra no teor de umidade ótimo e com a mesma energia, apenas variando-se o fluido ao qual foi homogeneizado e colocado para saturação, pode-se dizer que esse fator apresenta maior ligação com a resistividade do fluido.

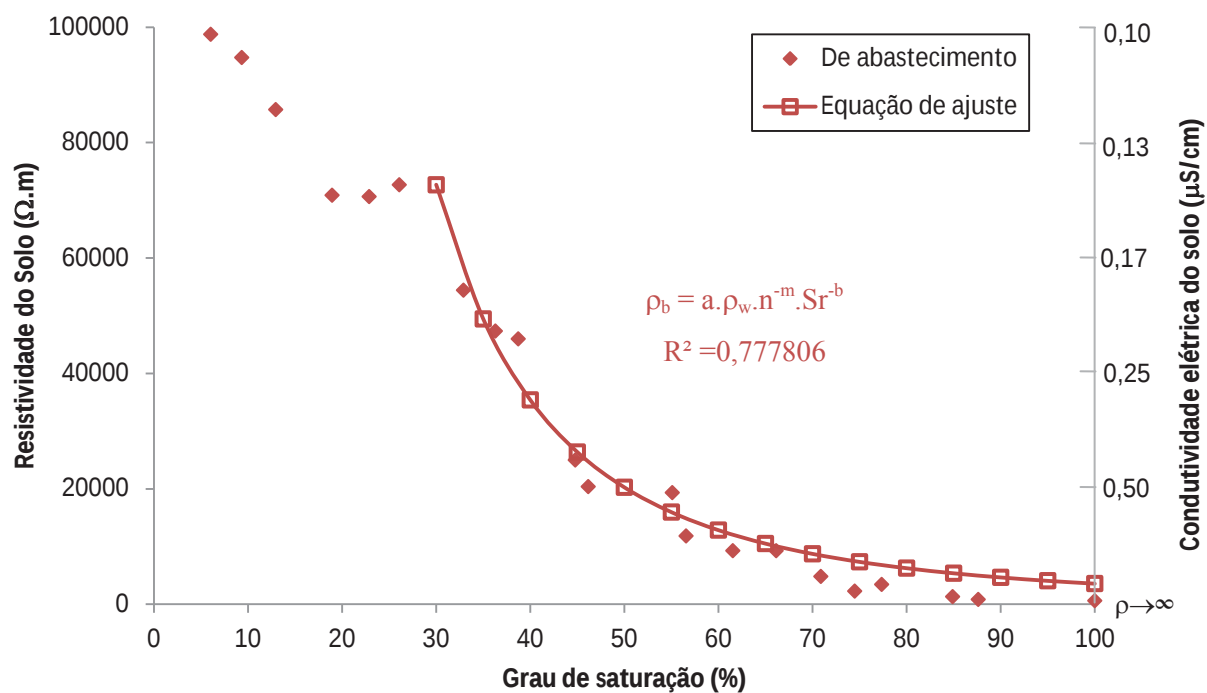


Figura 5. 20 – Ajuste da Lei de Archie no Solo Bauru para a água de abastecimento.

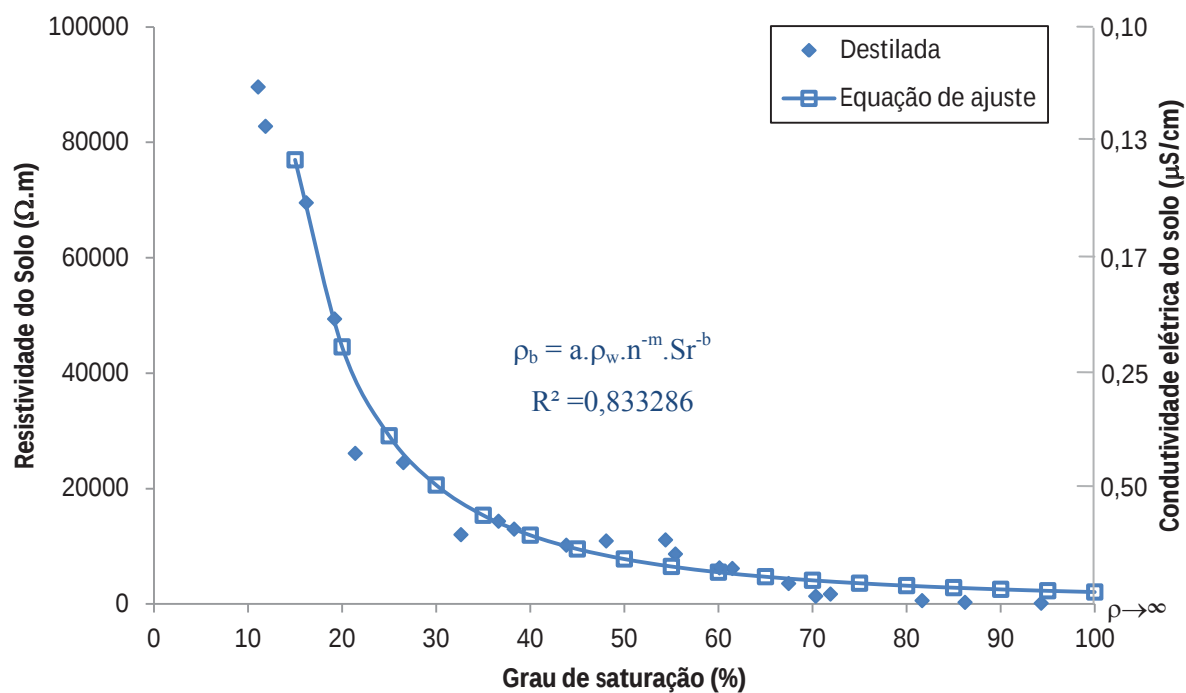


Figura 5. 21 - Ajuste da Lei de Archie no Solo Piracicaba para a água destilada.

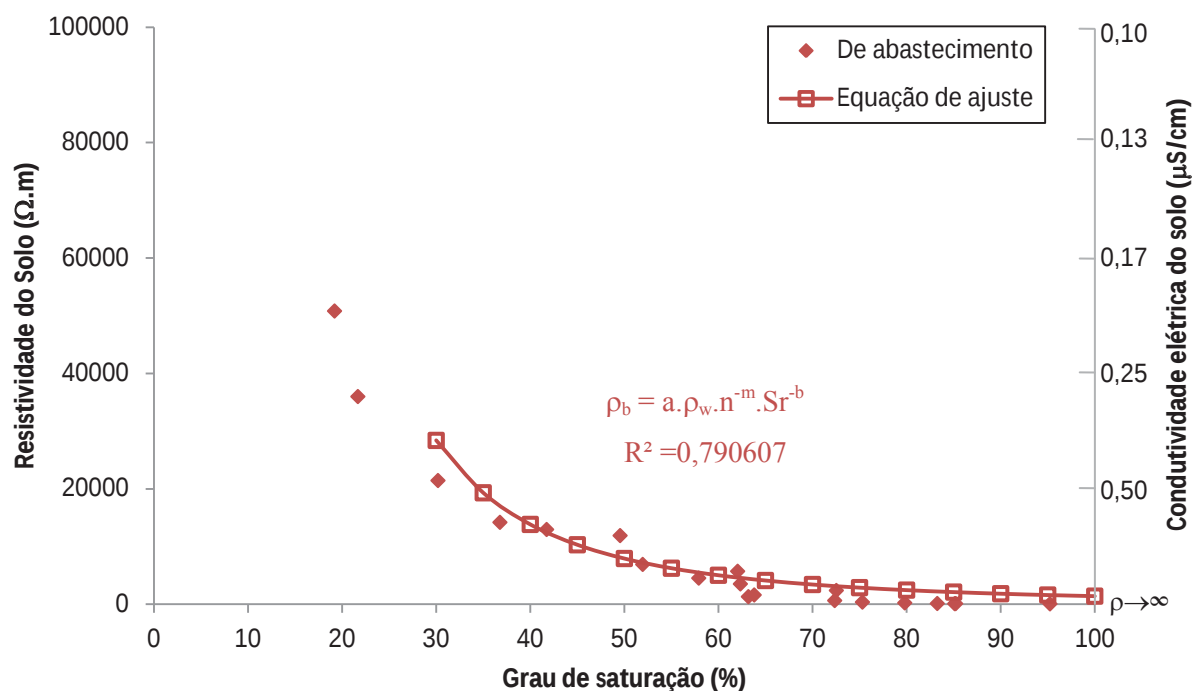


Figura 5. 22 - Ajuste da Lei de Archie no Solo Piracicaba para a água de abastecimento.

Tabela 5. 7 – Dados das equações referente a Lei de Archie para os dois fluidos.

	Solo Bauru		Solo Piracicaba	
	Destilada	De abastecimento	Destilada	De abastecimento
a	0,05	6	0,03	4
m	1,6	1,8	1,6	1,8
b	1,9	2,5	1,9	2,5
$\rho_w (\Omega.m)$	15.037,59	72,64	18.867,92	74,02
n (%)	30	31	44	42

No entanto, as equações formuladas com esses parâmetros e o coeficiente de determinação satisfazem quando o grau de saturação está acima de 30%, ou com teor de umidade acima de 4,5% para o Solo Bauru e 8% para o Solo Piracicaba.

Analizando-se os dados de resistividade em função da sucção matricial (**Figura 5. 23** e **Figura 5. 24**) e posteriormente com o teor de umidade (**Figura 5. 25** e **Figura 5. 26**) obteve-se novas equações de correlação, sendo que em ambos os casos coeficientes de determinação foram próximos a 1. Sendo que neste último conjunto, observou-se que a curva que melhor se ajusta aos pontos formados pelo par de valores, resistividade elétrica versus teor de umidade, foi um

polinômio para o Solo Bauru, enquanto que para o Solo Piracicaba notou-se que a taxa de variação da resistividade foi muito maior gerando uma curva exponencial.

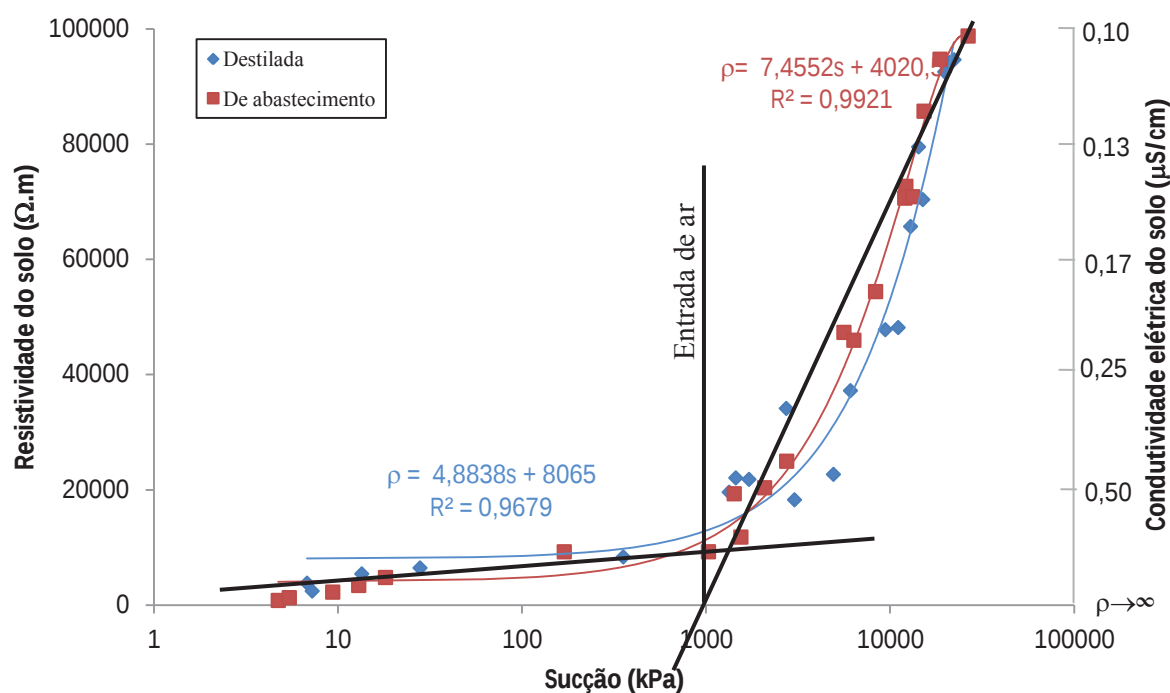


Figura 5. 23 - Resistividade em função da sucção matricial para o Solo Bauru.

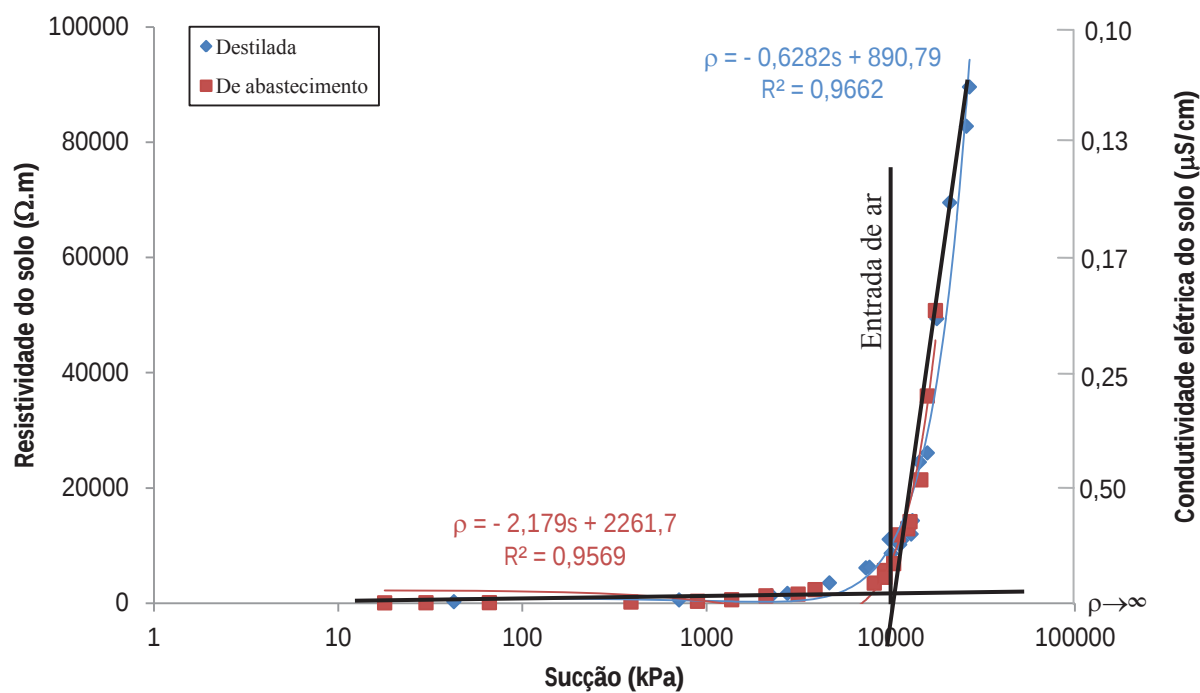


Figura 5. 24 - Resistividade em função da sucção matricial para o Solo Piracicaba.

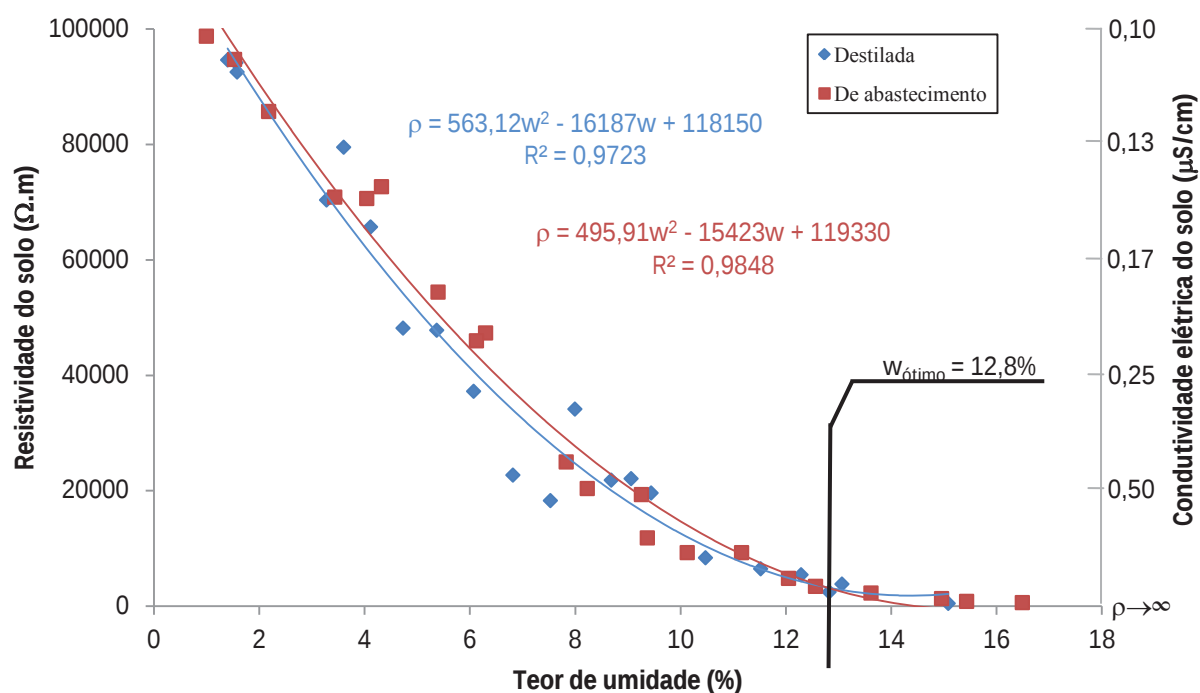


Figura 5. 25 - Resistividade em função do teor de umidade para o Solo Bauru.

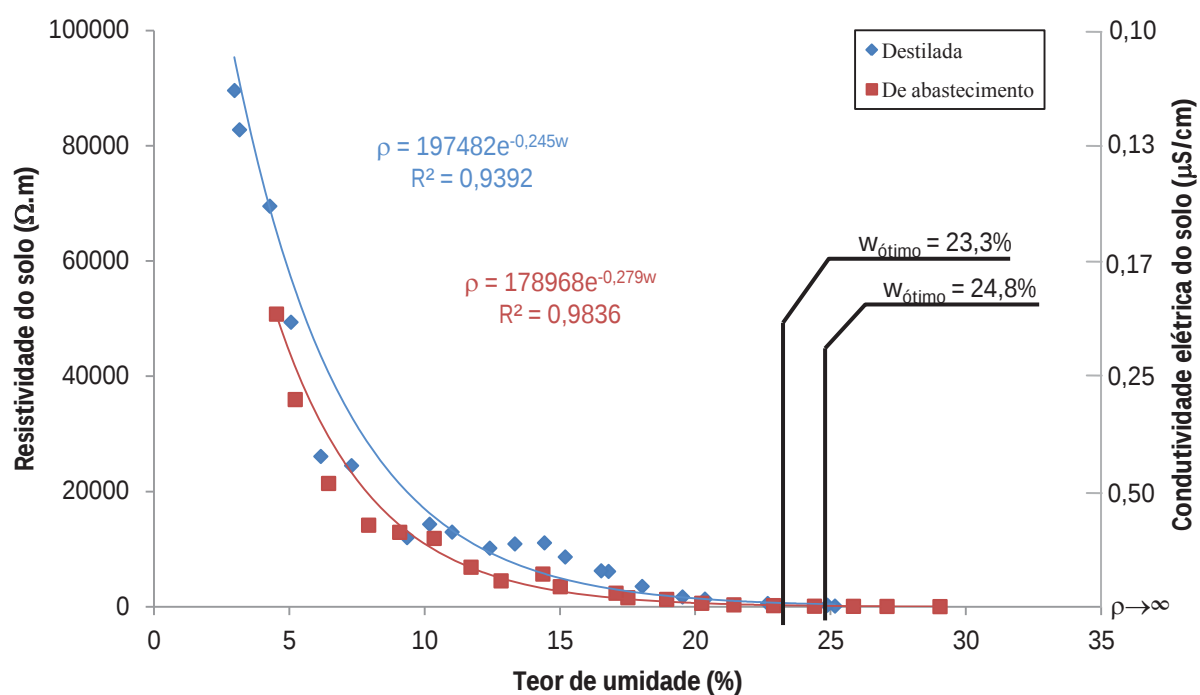


Figura 5. 26 - Resistividade em função do teor de umidade para o Solo Piracicaba.

Lembrando que como os corpos-de-prova foram extraídos de um mesmo cilindro compactado próximo ao teor de umidade ótimo, os pontos possuem massa específica aparente seca,

índice de vazios e porosidade muito próximos. Assim variando-se a quantidade de água no solo pela secagem das amostras pode-se constatar que a resistividade aumenta quanto maior for a sucção matricial e mais seco o material estiver.

Analisando os gráficos das **Figura 5. 23** e **Figura 5. 24** verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica do solo sofre uma mudança drástica a partir do ponto em que ocorre a primeira entrada de ar nos vazios, este determinado pela curva de retenção de água no solo. Dessa maneira, pode-se considerar que a relação entre a resistividade elétrica do solo e a sucção matricial é dividida em dois trechos. O primeiro trecho representa a amostra mais úmida, com a medida de resistividade praticamente constante e sucção baixa. E o segundo, ocorrendo o rompimento da continuidade da água dentro dos poros, a amostra apresenta-se mais seca com elevado nítido da medida da resistividade.

Pelos gráficos das **Figura 5. 25** e **Figura 5. 26** pode-se observar a mesma tendência observada no ensaio de compactação, em que nos teores de umidade abaixo da ótima houve grande variação nos valores de resistividade do solo, esse resultado pode ter sido afetado pelo fato de existir maior quantidade de ar nos vazios. Porém, pode-se notar que a curva permanece descendente com tendência a um valor constante da medida de resistividade após o teor de umidade ótimo.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

Nessa dissertação de mestrado foram realizados ensaios de compactação e permeabilidade à carga variável, em equipamentos miniatura, com a aquisição simultânea da resistividade elétrica no solo variando-se o teor de salinidade do fluido. Seguindo o mesmo objetivo de avaliar o comportamento da medida da resistividade elétrica no solo, determinou-se a curva de retenção de água juntamente com a aquisição dessa medida.

Analizando todos os resultados obtidos, podem-se ressaltar as considerações finais a seguir.

De forma geral, aumentando-se o teor de umidade no momento da compactação a resistividade diminui, visto que a condutividade elétrica do meio aumenta e nas concentrações mais elevadas observa-se uma tendência a um ponto de equilíbrio da resistividade quando o grau de saturação está acima de 80%.

Um ponto importante observado na curva de compactação com os diferentes fluidos foi o ponto de umidade ótimo, pois no trecho abaixo deste houve grande variação nos valores de resistividade do solo, esse resultado pode ter sido afetado pelo fato de existir maior quantidade de ar nos vazios. Porém, pode-se notar que a curva permanece descendente com tendência a um valor constante da medida de resistividade após o mesmo valor.

Observou-se uma tendência do aumento da resistividade com o aumento do índice de vazios “e” ao caminhar para o ramo seco da curva de compactação. Porém, aumentando-se “e” no ramo úmido da mesma curva a resistividade diminui tendendo a um equilíbrio devido aos vazios do solo estarem preenchidos por água em vez de ar como no ramo seco.

Pelo ensaio de permeabilidade a carga variável, verificou-se que quanto maior a quantidade de água nos vazios há um aumento da condutividade elétrica do meio. Porém, no ensaio realizado com água de abastecimento apresentou comportamento diferenciado dos demais, sendo que esta pode apresentar elementos que reagem com o solo proporcionando essa mudança.

Analizando a influência do tipo de solo e da concentração de NaCl presente no fluido de percolação no comportamento da resistividade elétrica, exclusivamente para as amostras em

questão, pode-se dizer que o tipo de solo apresenta maior influência nessa medida, visto que aumentando-se a concentração de partículas de argila houve uma queda de aproximadamente 10 vezes no valor da resistividade independente do fluido. Enquanto que, para uma mesma amostra, aumentando-se a concentração de NaCl no fluido a variação na medida de resistividade foi menor.

Uma relação que se demonstrou interessante foi a relação da resistividade elétrica efetiva do solo saturado com a resistividade da solução a qual foi submetido à percolação, denominado fator de formação (FF). Pelos valores do fator de formação calculados pode-se dizer que quando o fluido possui resistividade muito alta, ou condutividade quase nula, a resistividade do solo é inibida por este. Porém, com o aumento da condutividade do fluido a resistividade por sua vez diminui e o fator de formação para a amostra do Solo Bauru permanece em torno de 7,5.

Pelo ensaio de determinação da curva de retenção da água, constatou-se que a resistividade aumenta quanto maior for a sucção matricial e mais seco o material estiver.

Ao relacionar o grau de saturação do solo diretamente com a sua respectiva medida da resistividade elétrica ajustou-se a equação da Lei de Archie e a qual obteve-se coeficientes de determinação próximos a 0,8. O valor correspondente ao parâmetro “a” dessa equação foi o que apresentou maior dispersão em relação ao dado inicial, o que era esperado devido ao solo ser compactado. Mas como ambos os ensaios foram realizados compactando-se as amostras no teor de umidade ótimo e com a mesma energia, apenas variando-se o fluido a qual foi homogeneizado e colocado para saturação, pode-se dizer que esse fator apresenta maior ligação com a resistividade do fluido. No entanto, as equações formuladas com esses parâmetros e o coeficiente de determinação satisfazem quando o grau de saturação está acima de 30% para ambas as amostras.

Assim, elaborou-se uma nova equação de ajuste abrangendo todos os pontos de resistividade, correlacionando-a com o teor de umidade e em seguida com a sucção matricial. Essas por sua vez, obtiveram o coeficiente de determinação muito próximo de 1.

Verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica do solo sofre uma mudança drástica a partir do ponto em que ocorre a primeira entrada de ar nos vazios, este determinado pela curva de retenção de água no solo. Dessa maneira, pode-se considerar que a relação entre a resistividade elétrica do solo e a sucção matricial é dividida em dois trechos. O primeiro trecho representa a amostra mais úmida, com a medida de resistividade praticamente constante e sucção baixa. E o segundo, ocorrendo o rompimento da continuidade da água dentro dos poros, a amostra apresenta-se mais seca com nítido aumento da medida da resistividade.

6.2 Propostas para Atividades Futuras

Avaliação da resistividade elétrica na curva de retenção de água pelo método do papel filtro com as soluções de NaCl para melhor compreender o seu comportamento com possíveis contaminantes; e na trajetória de umedecimento, visto que a sucção apresenta um deslocamento em relação a trajetória de secagem.

Elaboração de equipamento e metodologia nacional que possibilite a obtenção da medida em campo, proporcionando um apelo comercial ao desenvolvimento dessa ferramenta.

Comparação dos ensaios de resistividade elétrica de laboratório com amostras compactadas com aqueles realizados em um aterro compactado em utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., & Blotz, L. R. (1996). Electrical Resistivity of Compacted Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122 (Nº 5), p. 397-406.
- American Society Technical Materials. (2001). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. G57 - 95a*. ASTM International.
- Aquino, F. R. (2010). *Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, UnB, Engenharia Civil e Ambiental, Brasília/DF.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). *Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. NBR 6457*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Método de Ensaio. NBR 6459/84*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio. NBR 7180/84*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). *Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio. NBR 7182/86*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *Solo – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - Determinação da Massa Específica dos Sólidos. Método de Ensaio. NBR 6508/84*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *Solos – Análise Granulométrica. Método de Ensaio. NBR 7181/84*. ABNT.
- Bang, E. S., Sung, N. H., Park, S. G., Kim, J. H., Kim, Y. S., Seo, D. N., et al. (2008). Development and Verification of a Resistivity Seismic Flat Dilatometer Testing System for Efficient Soft Soil Site Characterization. *The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3. Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Londres.*, pp. 1247 - 1253. Taipei, Taiwan: Taylor & Francis Group Ed.
- Bicalho, K. V., Correia, A. G., Ferreira, S. R., Fleureau, J. M., & Marinho, F. A. (2007). Filter Paper Method of Soil Suction Measurement. *13th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Isla Margarita, Venezuela.

- Bolinelli Junior, H. L., Peixoto, A. S., Giacheti, H. L., Elis, V. R., Hamada, J., Mio, G. d., et al. (2002). Piezocone de Resistividade: Primeiros Resultados de sua Aplicação para Investigação Geoambiental de um Aterro Sanitário. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. Ouro Preto/ MG.
- Bollini, L. E., & Peixoto, A. S. (2011). Aferição dos dispositivos de leitura de resistividade considerando o efeito da temperatura. *XXIII Congresso de Iniciação Científica da Unesp*. Bauru/SP.
- Bonini, A. O. (2005). *Proposta de um Método de Ensaio para Determinação do Volume de Azul de Metileno Adsorvido pela Fração Fina de Solos Tropicais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Transportes, São Carlos/SP.
- Boszczowski, R. B. (2008). *Avaliação de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de um Perfil de Alteração de Granito-Gnaiss de Curitiba-PR*. Rio de Janeiro/ RJ: Tese de doutorado. PUC-Rio.
- Campanella, D. R., Kristiansen, H., Daniel, C., & Davies, M. P. (1998). Site Characterization of Soils Deposits Using Advances in Piezocone Technology. *Proceedings of the 1st Conference on Geotechnical Site Characterization*, (pp. 995-1000). Georgia/USA.
- Campanella, R. G., & Weemes, I. A. (1989). Development and Use of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies. *The 42th Canadian Geotechnical Conference*, (pp. 1-11). Winnipeg.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Daniel, C. (1997). *An Investigation of the Factors Affecting Bulk Soil Electrical Resistivity*. Bachelor thesis, University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Vancouver, Canadá.
- Das, B. M. (1994). *Principles of Geotechnical Engineering* (3rd ed.). Boston: PWS Publishing Company.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. (1994). *Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão. Método de Ensaio*. DNER – ME 256/94.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. (1997). *Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-CBR e expansão. Método de Ensaio*. DNER – ME 254/97.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. (1994). *Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-MCV. Método de Ensaio*. DNER – ME 258/94.
- Fabbri, G. T. (1994). *Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Transportes - STT, São Carlos/SP.
- Giacheti, H. L., Peixoto, A. P., Mondelli, G., & Mio, G. d. (2006). Resistivity Piezocone for Geo-environmental Site Characterization of Soils: Two Case Histories from Brazil. *5th International Congress on Environmental Geotechnics*. Cardiff: Thomas Telford.

- Hassona, F. A., Hassan, M. A., Abu-Heleika, M. M., & Sidhom, A. E. (2008). Correlations Between Electrical Resistivity and Some Properties of Clayey Soil. *The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3* (pp. 837-841). Taipei, Taiwan: Taylor & Francis Group Ed.
- Jackson, P. D., Smith, D. T., & Stanford, P. N. (1978). Resistivity-porosity-particle Shape Relationships for Marine Sands. *Geophysics*, Vol. 43 (n° 6), pp 1250-1268.
- Kalinsky, R. J., & Kelly, W. E. (1994). Estimating Water Content of Soils from Electrical Resistivity. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16 (n° 3), pp. 323-329.
- Kishimoto, M. M. (2011). *Estudo da Influência da Temperatura no Dispositivo para Leitura da Resistividade em Laboratório*. Bauru/ SP: Relatório de Iniciação Científica, FAPESP - Processo: 2009/17797 - 3.
- Koefoed, O. (1979). Resistivity Sounding Measurements. Amsterdam: Elsevier.
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. (1997). *Cone Penetration Test in Geotechnical Practice*. London: Blackie Academic & Professional.
- Mc Queen, I. S., & Miller, R. F. (1968). Calibration and Evaluation of wide-range gravimetric method for measuring soil. *Soil Science* 10, (pp. 521-527).
- Miguel, M. G., Teixeira, R. S., & Padilha, A. C. (2006). Curvas características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. *Revista de Ciências & Tecnologia*, 12, 63-74.
- Miranda, J. F., Costa, P. T., & Santos, F. M. (1997). Cap. 5 - Geoeletricidade. In: *Fundamentos de Geofísica* (pp. 120-134).
- Mondelli, G. (2008). *Integração de Diferentes Técnicas de Investigação para Avaliação da Poluição e Contaminação de uma Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese (doutorado), EESC - USP, São Carlos/SP.
- Mondelli, G., Zuquete, L. V., Giacheti, H. L., Hamada, J., & Elis, W. (2006). Considerações sobre a Implantação de Sistemas de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo de Caso. *XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG*. Curitiba/PR.
- Nascimento, C. T., Pires, A. C., & Moraes, R. A. (2004). Reconhecimento de Solos por Meio de Resistividade Elétrica e Radiação Gama. *Revista Brasileira de Geociências*, 34, 383-392.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive Soils - Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons.
- Nogami, J. S. (1972). Determinação do Índice de Suporte Califórnia com equipamento de dimensões reduzidas (ensaio de Mini-CBR). *2ª Reunião das Organizações Rodoviárias*. Brasília.
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo: Vilibor.
- Oh, M. H., Kim, Y. S., Park, J. B., & Kwon, O. S. (2008). Laboratory Study on Applicability of Resistivity cone for investigation of subsurface contamination. *The 3rd International Conference*

- on Site Characterization, ISC'3. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Londres., pp. 737-743. Taipei, Taiwan.: Taylor & Francis Group Ed.
- Pacheco, A. O. (2004). *Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados*. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPR/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.
- Paz, E. C., & Campelo, N. S. (2005). Avaliação Comparativa de Métodos Laboratoriais de Medição de Resistividade Elétrica do Solo: Uma Abordagem Teórica. *Solos e Rochas, Revista Latino-americana de Geotecnia*, Vol. 28 (Nº 2), 223-228.
- Peixoto, A. P., Pregnotato, M. C., Silva, A. C., Yamasaki, M. T., & Conte Junior, F. (2010). Development of an Electrical Resistivity Measure for Geotechnical and Geoenvironmental Characterization. *CPT'10 - The 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, California/USA.
- Pejon, O. J. (1992). *Mapeamento Geotécnico da Folha de Piracicaba-SP (Escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação dos Atributos*. Tese de doutorado, EESC - USP, São Carlos/SP.
- Pincelli, A. L. (2004). *Desenvolvimento e Ensaio de um Sistema de Mensuração de Condutividade Elétrica do Solo*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba/SP.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. São Paulo/SP: Oficina de Textos.
- Pregnotato, M. C. (2011). *Avaliação do Efeito de Borda no Ensaio de Resistividade Elétrica de Laboratório para uma Areia de Cava*. Relatório de Iniciação Científica/ FAPESP., UNESP - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Bauru/SP.
- Pregnotato, M. C., & Peixoto, A. P. (2010). Desenvolvimento de Dispositivo de Medida de Resistividade para a Investigação Geotécnica e Geoambiental do Subsolo. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG*. Gramado/RS.
- Rocha, R., Ramalho, E. C., & Afonso, A. A. (2003). Estimativa de Porosidades em Rochas Básicas a Partir de Diagramas Elétricos e Nucleares Através de Dois Métodos: um Estudo Comparativo. In: *VI Congresso Nacional de Geologia*, (pp. E50-E53, CD-ROM). Monte de Caparica: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Rodrigues, R. A. (2007). *Modelação das Deformações por Colapso devidas à ascensão de Lençol Freático*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Geotecnia, São Carlos/SP.
- Silva, A. C. C. L. (2009). *Desenvolvimento de Equipamento para Leitura da Resistividade Elétrica em Laboratório*. Relatório de Iniciação Científica/ FAPESP, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil, Bauru/SP.
- Silva, A. C. (2006). *Estudo de Estabilização de Solo Típico da Região de Bauru para Pavimentação Urbana e Controle de Capacidade de Suporte dos Respectivos Materiais em Campo*. Relatório de Iniciação Científica/ FAPESP, Bauru/SP.

- Silva, A. C., Peixoto, A. S., & Ide, D. M. (2006). Comparação dos Resultados Obtidos Através do Ensaio Mini-CBR de Laboratório com os Resultados Obtidos Através do Mini-CBR de Campo. *II GeoJovem*. Nova Friburgo/RJ.
- Soto, M. A. (2004). *Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaio com Solos Não Saturados*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd Edition ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Nostrand, R. G., & Cook, K. L. (1966). Interpretation of Resistivity Data. *U.S. Geological Survey, Professional Paper 499*, Washington D.C.
- Vargas, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: MCgraw-Hill do Brasil.
- Weemes, I. A. (1990). *Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies*. Vancouver, CA.: M.A.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of British Columbia.
- Yamasaki, M. T. (2009). *Ensaio de Laboratório para Avaliação da Resistividade Elétrica em um Solo Tropical Arenoso*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista, UNESP., Engenharia Civil, Bauru/SP.
- Yamasaki, M. T., Peixoto, A. P., & Ulson, J. C. (2010). Ensaio de Laboratório para Avaliação da Resistividade Elétrica em um Solo Tropical Arenoso. *VX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG*. Gramado/RS.
- Yoon, G. L., Oh, M. H., & Park, J. B. (2002). Laboratory Study on Landfill Leachate Effect on Resistivity in Unsaturated Soil Using Cone Penetrometer. *Vol. 43*, 18-28.