



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

LUCIANA GARCIA CAMPOS

**VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA TRÊS SOLOS
NÃO SATURADOS**

Bauru
2015



LUCIANA GARCIA CAMPOS

**VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA TRÊS SOLOS
NÃO SATURADOS**

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

Orientadora: Profa. Dra. Anna Silvia
Palcheco Peixoto

Bauru
2015

Campos, Luciana Garcia.

Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados / Luciana Garcia Campos, 2015
146 f.

Orientador: Anna Silvia Palcheco Peixoto

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

1. Resistividade elétrica. 2. Sucção. 3. Papel filtro. 4. Piezocone. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

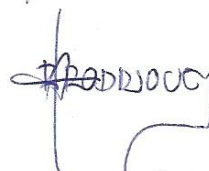
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUCIANA GARCIA CAMPOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de dezembro do ano de 2015, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB/por Skype, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. PAULO JOSE ROCHA DE ALBUQUERQUE do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Estadual de Campinas, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUCIANA GARCIA CAMPOS, intitulada "VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA TRÊS SOLOS NÃO SATURADOS". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO



Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES



Prof. Dr. PAULO JOSE ROCHA DE ALBUQUERQUE



Dedicatória

*Aos meus pais Maria e Carlos pelo exemplo de vida,
por todo o carinho e apoio que sempre me dedicaram
tornando possível alcançar este sonho.*

*Vencer mais essa etapa da minha vida só foi possível
graças a Deus e a vocês, meus queridos pais.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por iluminar todas as decisões que permitiram superar mais esta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais Maria Garcia Verardo Campos e Carlos Alberto Campos que, com infinta sensibilidade, compreenderam a relevância desta fase de minha caminhada. Com um esforço incalculável e visando acima de tudo minha realização pessoal, ofereceram-me a oportunidade e condições mais do que favoráveis para realização desta pós-graduação.

A minha irmã Mariana Garcia Verardo Campos e ao meu namorado Pedro Henrique Silvério, que permaneceram ao meu lado, amparando-me sempre que puderam. Todo o carinho, motivação, paciência e apoio que me foram concedidos nesta fase final jamais serão esquecidos.

A minha orientadora, professora e amiga Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto, inicialmente por sua disposição em ajudar, transmitir seus conhecimentos e posteriormente pela paciente e zelosa orientação que recebi em todos os passos deste trabalho.

Ao professor Dr. Roger Augusto Rodrigues pelo rico aprendizado, pela paciência, disponibilidade, dedicação e incentivo para que fosse possível o desenvolvimento dos ensaios realizados.

Ao técnico de Laboratório Gustavo FEB-UNESP, pela toda a atenção e empenho na execução dos trabalhos.

Aos alunos, amigos e companheiros Lucas Savio Fagundes, Marluci C. Prenolato, Mellissa Miyeko Kishimoto e Márcia Tiemi Yamasaki, pela preciosa amizade cultivada, pelas palavras sábias e louvável iniciativa de colaborar neste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela bolsa de mestrado concedida e auxílio no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram neste estudo.

Muito obrigada!

Luciana Garcia Campos

Resumo

CAMPOS, L. G. *Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados*. 2015. 102p. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2015.

Os estudos de técnicas modernas na investigação geotécnica vêm avançando a cada ano com o objetivo de obter resultados mais rápidos e práticos com maior precisão. A resistividade elétrica vem ganhando atenção devido ao seu apelo ambiental, visto que, a obtenção desta medida se dá por meio da imposição de um fluxo de corrente elétrica em um dado material. Porém a interpretação dos resultados em solo tropical é dificultada pelas variáveis envolvidas, como a não saturação e os argilo-minerais. O objetivo desta dissertação de mestrado é verificar a influência que a sucção, presente em solos não saturados, têm sobre os valores de resistividade/condutividade elétrica. Também foi possível analisar as curvas de retenção de água dos solos obtidas pelas diferentes trajetórias, secagem e umedecimento, observando sua interferência nos valores de Resistividade elétrica. Essas trajetórias representam o fluxo de água no solo durante o ano, como as estações secas e úmidas. Esse estudo tem importância em regiões de clima árido e tropical, em que solos têm como característica principal baixa umidade próxima à superfície, podendo sofrer ciclos alternados de secagem e umedecimento, e assim, constante mudança dos valores de sucção. Utilizaram-se três solos: areia argilosa de origem residual do Arenito Bauru, retirada do Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru; argila arenosa residual de diabásio, proveniente do Aeroporto Estadual de Piracicaba; e uma areia fina com pouca argila, retirada do processo erosivo ao longo do córrego Água Comprida. Em cada ensaio foram obtidos: resistividade elétrica, temperatura do solo e do fluido, teor de umidade, grau de saturação e índice de vazios. Para a curva de retenção de água no solo, foi utilizado o método do Papel Filtro sob trajetória de secagem e de umedecimento. O formato da curva de retenção depende, dentre outros fatores, do tipo de solo e do tamanho e distribuição de seus poros. Através dos resultados obtidos é possível avaliar a influência do grau de saturação e, portanto, da sucção no solo e estabelecer relações entre a sucção e o valor obtido no ensaio de resistividade. Além de verificar as diferenças quando o solo apresenta histerese.

Palavras-chaves: Resistividade elétrica, Sucção, Papel filtro, Piezocone.

Índice de Figuras

Figura 3.1 - Representação esquemática do desenvolvimento das linhas de campo e de corrente. (a) no modelo idealizado – meio aquoso, (b) em meio particulado – solo. (Fonte: Pacheco, 2004).....	7
Figura 3.2 - Resumo dos valores de resistividade elétrica para os cinco locais estudados por Rømoen <i>et al</i> (2010)	10
Figura 3.3 - Relação entre Resistividade e Índice de vazios para amostras deformadas, mantendo-se o teor de umidade constante. (BOSZCZOWSKI, 2008)	14
Figura 3.4 - Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade para diferentes fases de retenção da água (adaptado Poznyakov <i>et al</i> , 2006)	15
Figura 3.5 - Resultados dos dois métodos para obtenção da resistividade elétrica em ensaios de compactação (adaptado de Yamasaki <i>et al</i> , 2010)	16
Figura 3.6 - Esquema geral da caixa de solo Miller <i>apud</i> Paz e Campelo (2005).....	21
Figura 3.7 - Vista superior da célula de resistividade.....	22
Figura 3.8 - Ensaio para determinação da resistência elétrica em amostras deformadas, Soil Box <i>apud</i> Boszczowski (2008)	23
Figura 3.9 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade elétrica <i>apud</i> Boszczowski (2008)	23
Figura 3.10 – Mini-sensor de resistividade (PEIXOTO <i>et al</i> , 2010).....	24
Figura 3.11 - Configuração do Ensaio com as Placas de Cobre (YAMASAKI <i>et al</i> , 2010)	25
Figura 3.12 - Configuração do ensaio de resistividade com o mini-sensor (YAMASAKI, 2010)	25
Figura 3.13 – Variação da pressão de água num perfil de solo. <i>Apud</i> Rodrigues,2007.....	27
Figura 3.14 - Curva de retenção de água de um solo (adaptado de FREDLUND e XING, 1994)	31
Figura 3.15 – Curvas de retenção de água no solo. (Fonte: Rodrigues,2007)	32
Figura 3.16 - Curvas de retenção de água no solo. (adaptado de FREDLUND e XING, 1994).....	32
Figura 3.17 – Sucção matricial do solo em função da resistividade elétrica. <i>Apud</i> De Vita <i>et al</i> .(2012).....	36
Figura 4.1– Localização das cidades de onde foram retiradas as amostras. (Adaptado de CPRM, 2006.)	39
Figura 4.2 - Foto do local de onde foi extraída a amostra na Erosão em Bauru.	40
Figura 4.3 – Talude de onde foram retiradas as amostras de solo.	40
Figura 4.4 - Foto do talude pelo qual foi extraída a amostra em Piracicaba.....	41
Figura 4.5 – Projeto do cilindro sem escala com as medidas em milímetros. (YAMASAKI, 2012)	42
Figura 4.6 – Equipamento para o ensaio de compactação. (YAMASAKI, 2012).....	42
Figura 4.7- Mini-cilindro de compactação e modelo do cilindro grande. (YAMASAKI, 2012).....	43
Figura 4.8 — Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade no mini-cilindro (YAMASAKI, 2012).....	44
Figura 4.9 – Detalhe da tampa e do ralo superior (YAMASAKI, 2012).....	44
Figura 4.10– (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Balança eletrônica.	45
Figura 4.11– Projeto dos anéis e bolachas sem escala com medidas em milímetros.....	46
Figura 4.12 – Equipamentos do ensaio para compactação e extração dos corpos-de-prova (YAMASAKI, 2010).....	46
Figura 4.13 – Foto dos equipamentos utilizados para leitura da resistividade (YAMASAKI, 2010).....	47

Figura 4.14 – Estrutura montada para o ensaio de aquisição da resistividade em conjunto com a sucção matricial.....	48
Figura 4.15 – Ensaio de Azul de Metileno. (a) Materiais utilizados e (b) detalhe do ensaio.	50
Figura 4.16 – Curva de compactação com energia Proctor normal.	51
Figura 4.17 – Processo para obtenção da umidade. (a) amostra partida ao meio, (b) pesagem da porção retirada e (c) homogeneização da amostra para reuso.	52
Figura 4.18 – Ligação do cilindro ao sistema com o sobrepeso.	53
Figura 4.19 - Detalhe do tanque inferior com orifício de escape.....	54
Figura 4.20– Sequência para montagem do permeâmetro, sem escala.....	55
Figura 4.21 – (a) Corpo de prova de onde as amostras foram retiradas; (b) Processo de retirada das amostras.	57
Figura 4.22 – (a) e (b) Processo de saturação das amostras.....	58
Figura 4.23 – (a) Amostras no processo de secagem; (b) Amostras após colocação do papel filtro e embalagem.	58
Figura 4.24 – (a) Amostras no processo de secagem; (b) Amostras durante o processo de gotejamento controlando o peso.....	59
Figura 4.25 – Esquema para realização do ensaio de papel filtro em conjunto com o ensaio para leitura de resistividade.....	60
Figura 4.26 – Montagem do circuito para realização das leituras.	61
Figura 4.27 - Amostra durante o ensaio de resistividade.	62
Figura 5.1 – Curva granulométrica com e sem defloculante do solo A (Erosão).	65
Figura 5.2 – Curva granulométrica com e sem defloculante do solo B (Aterro Bauru).	65
Figura 5.3 – Curva granulométrica com e sem defloculante do solo C (Aterro Piracicaba).....	66
Figura 5.4 – Curva de compactação com energia Proctor normal.	67
Figura 5.5 – 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).....	69
Figura 5.6 – Diagramas da atividade das argilas pelo método do azul de metileno (LAUTRIN, 1989 <i>apud</i> PEJON, 1992).....	70
Figura 5.7 — Gráfico dos pontos obtidos para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.....	74
Figura 5.8 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.	75
Figura 5.9 — Gráfico dos pontos obtidos para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.	76
Figura 5.10 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.	77
Figura 5.11 – Gráfico da Curva de retenção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Destilada e Potável.....	78
Figura 5.12 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.	79

Figura 5.13 – Gráfico da Curva de retenção para o solo A indeformado através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Destilada.	84
Figura 5.14 – Curvas de Retenção de água no solo para a amostra A indeformada - Trajetórias de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	85
Figura 5.15 – Curvas de Retenção de água no solo para a amostra A indeformada e Compactada - Trajetórias de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	87
Figura 5.16 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	90
Figura 5.17 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	90
Figura 5.18– Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	91
Figura 5.19 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	91
Figura 5.20 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	92
Figura 5.21 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	92
Figura 5.22 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destila.	94
Figura 5.23 – Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	94
Figura 5.24 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destila.	95
Figura 5.25 – Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	95
Figura 5.26 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destila.	96
Figura 5.27– Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.	96
Figura 5.28 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	98
Figura 5.29 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	99
Figura 5.30 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	99
Figura 5.31 – Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento.	102
Figura 5.32 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento.	102

Figura 5.33 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento.	103
Figura 5.34 - Curva de Retenção modificada do Solo A Compactado.	105
Figura 5.35 - Curva de Retenção modificada do Solo B Compactado.	105
Figura 5.36 - Curva de Retenção modificada do Solo C Compactado.	106
Figura 5.37 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo A, indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	107
Figura 5.38 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.....	107
Figura 5.39 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	109
Figura 5.40– Gráfico de Resistividade Grau de Saturação para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.....	109
Figura 5.41- Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A indeformado através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.	110
Figura 5.42 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A, indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento.	111
Figura 5.43 - Curva de Retenção modificada do Solo A Indeformado.....	113

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Tendência da resistividade em relação as diferentes características do solo (Razali & Osman, 2011).....	8
Tabela 3.2 - Resumo dos resultados de Yamasaki <i>et al</i> (2012).	12
Tabela 3.3: Solo 1 (Areia Argilosa) - Resistividade do solo saturado (ρ_{sat}), condutividade elétrica da água (C_w), resistividade da água no fluido de percolação (ρ_w), fator de formação da lei de Archie (F) (Peixoto <i>et al.</i> , 2014).	20
Tabela 3.4: Solo 2 (Argila Arenosa) - Resistividade do solo saturado (ρ_{sat}), condutividade elétrica da água (C_w), resistividade da água no fluido de percolação (ρ_w), fator de formação da lei de Archie (F) (Peixoto <i>et al.</i> , 2014).....	20
Tabela 3.5 - Métodos de medida de sucção adaptado de Ridley & Wray (1995).	33
Tabela 3.6- Curva de calibração para o papel filtro Whatman 42 (adaptado de BICALHO <i>et al.</i> , 2014).	34
Tabela 3.7 - Propriedades índices dos solos analisados apud Perez <i>et al.</i> (2009).....	35
Tabela 4.1 – Métodos utilizados para a caracterização das amostras.	49
Tabela 5.1 – Propriedades dos solos.....	64
Tabela 5.2 – Valores obtidos no ensaio de compactação com energia Proctor Normal.	67
Tabela 5.3 - Cálculo e análises do ensaio de azul de metileno pelo método de Pejon (1992).	68
Tabela 5.4 – Tabela de intervalos de Capacidade de troca de cátions.	69
Tabela 5.5 – Valor do coeficiente de permeabilidade para a amostra A, a 20°C.....	70
Tabela 5.6 – Valores do coeficiente de permeabilidade para as amostras B e C, a 20°C (YAMASAKI,2012).	71
Tabela 5.7 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para a amostra A.	71
Tabela 5.8 – Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para Amostra B (Adaptado de YAMASAKI, 2012).	71
Tabela 5.9 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para a amostra C (Adaptado de YAMASAKI, 2012).....	72
Tabela 5.10 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo A.	75
Tabela 5.11 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo B.	78
Tabela 5.12 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo C.	80
Tabela 5.13 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A.	82
Tabela 5.14 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo B.....	83
Tabela 5.15 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo C.....	83
Tabela 5.16 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado.	85
Tabela 5.17 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado.	86
Tabela 5.18 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado e compactado.	88
Tabela 5.19 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção.	104
Tabela 5.20 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção – Solo A indeformado e compactado.....	112
Tabela 6.1 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCPTu : Piezocone de resistividade.

ρ : Resistividade elétrica

R: Resistência Elétrica

A: Área seção transversal disponível para condução elétrica.

l: Comprimento(m).

V: diferença de potencial elétrico

i: corrente elétrica

Δq : variação de carga

Δt : intervalo de tempo

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

ρ_{ap} : resistividade aparente

ρ_b : resistividade aparente do solo

ρ_f : resistividade do fluido intersticial

ρ_n : resistividade normalizada

ρ_{sat} : resistividade do solo saturado

$\rho_{(T)}$: resistividade em determinada temperatura.

ER: eletroresistividade

ERT: Tomografia de resistividade elétrica

apud: adaptado de.

et al: e outros.

FF. fator de formação.

PPM: Partes por Milhão.

α : coeficiente experimental

T: temperatura em °C.

Vv : volume de vazios

c: distância entre eletrodos

d: raio do eletrodo

m: constante da Lei de Archie

m/s: metros por segundo, unidade de velocidade

m²: metro quadrado

n: porosidade

e: índice de vazios

Sr : grau de saturação

q₀: valor carga de prova introduzida num campo elétrico

R² : coeficiente de determinação

f : fator de correção de temperatura;

k_1 : constante da célula (m):

k_2 : constante da célula (ohm.m).

U: poro-pressão

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

ϵ . diferença de potencial em corrente alternada

ψ : potencial total de água no solo

ψ_g : potencial gravitacional de água no solo

ψ_m : potencial matricial de água no solo

ψ_{os} : potencial osmótico de água no solo

ψ_{pn} : potencial pneumático de água no solo

s: sucção matricial;

π : sucção osmótica;

M_w: massa molecular da água (0,018 kg.mol⁻¹);

R: constante de gases ideais (8,3143 J.mol⁻¹.K⁻¹);

T: temperatura absoluta (K);

V_w: volume específico da água;

Pv: pressão parcial de vapor; e

Pvs: pressão de vapor de saturação.

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

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

θ_s : umidade volumétrica de saturação

θ_r : umidade volumétrica residual

Sumário

RESUMO.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	VIII
SUMÁRIO.....	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	5
3.1.1 Resistividade Elétrica em Solos.....	8
3.1.2 Resistividade Elétrica em Laboratório	20
3.2 SOLOS NÃO SATURADOS	26
3.2.1 Sucção	29
3.2.2 Curva de Retenção de água no solo	30
3.2.3 Resistividade Elétrica e Sucção.....	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 SOLOS UTILIZADOS	37
4.2 EQUIPAMENTOS	41
4.2.1 Cilindros para Compactação	41
4.2.2 Ensaio de permeabilidade	43
4.2.3 Curva de Retenção de Água no solo.....	45
4.2.4 Ensaios de Resistividade Elétrica.....	46
4.3 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS.....	48
4.3.1 Caracterização das Amostras.....	48
4.3.2 Ensaio de permeabilidade	52
4.3.3 Curva de Retenção de Água no solo – Método do Papel filtro.....	56
4.3.4 Ensaios de Resistividade Elétrica.....	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	63
5.2 CURVAS DE COMPACTAÇÃO	66
5.3 ENSAIO DE AZUL DE METILENO.....	68

5.4	ENSAIO DE PERMEABILIDADE	70
5.5	CURVAS DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	72
5.5.1	<i>Amostras Compactadas</i>	73
5.5.2	<i>Amostra indeformada</i>	84
5.6	ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	89
5.6.1	<i>Amostras Compactadas</i>	89
	<i>Resistividade versus teor de umidade:</i>	89
	<i>Resistividade versus Grau de Saturação:</i>	93
	<i>Resistividade Elétrica em função da sucção do solo</i>	98
	<i>Equacionamento da resistividade Elétrica em função da sucção do solo</i>	101
5.6.2	<i>Amostra Indeformada</i>	106
	<i>Resistividade versus teor de umidade:</i>	106
	<i>Resistividade versus Grau de Saturação:</i>	108
	<i>Resistividade Elétrica em função da sucção do solo</i>	110
	<i>Análise da Resistividade</i>	111
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6.1	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA PELAS TRAJETÓRIAS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO	114
6.2	INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE E GRAU DE SATURAÇÃO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	115
6.3	ANÁLISES DOS RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E SUCÇÃO MATRICIAL	117
6.4	CONCLUSÃO.....	119
6.5	RECOMENDAÇÕES / SUGESTÕES.....	120
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

Através da medida da resistividade é possível detectar indicativos da presença de certas substâncias no lençol freático. Em áreas onde existem essas suspeitas, pode-se então efetuar uma avaliação complementar através da coleta, em profundidades discretas, de amostras da água subterrânea, proporcionando um meio rápido e econômico de realizar caracterizações geo-ambientais de campo. Essa tecnologia está desenvolvida e difundida em países de clima temperado, em que o comportamento do solo apresenta características diferentes dos solos tropicais, onde existe a presença de camada não saturada até grandes profundidades. Sabe-se que a maior parte dos solos brasileiros é composta por solos tropicais, não saturados, assim como os solos típicos da região de Bauru.

Resistividade elétrica é definida como a medida de quão bem a corrente elétrica passa por um determinado material. A resistividade elétrica de um material homogêneo é obtida através da passagem de corrente elétrica dependendo exclusivamente das dimensões do corpo de prova. No entanto, o solo é um material heterogêneo composto por três fases: sólido; líquido e gasoso. Sendo assim, a leitura da resistividade é influenciada por diversos fatores que em laboratório podem ser controlados ou minimizados. Porém a interpretação dos resultados em solo tropical é dificultada pelas variáveis envolvidas, como a não saturação e os argilo-minerais.

Em regiões de clima árido e tropical, onde os solos têm como característica principal baixa umidade próxima à superfície, podem sofrer ciclos alternados de secagem e umedecimento, e assim, constante mudança dos valores de sucção.

A sucção é a pressão isotrópica da água intersticial, que surge devido a condições físico-químicas. Os fatores que interferem na sucção do solo são basicamente o tipo de solo, o tamanho e distribuição dos seus poros, mineralogia e o seu comportamento com relação à água.

Yamasaki (2012) realizou estudos para avaliação da resistividade elétrica utilizando 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.

Estudos foram realizados com o solo compactado coletado no aterro de resíduos sólidos da cidade de Bauru (SP) em conjunto com Yamasaki(2012), apresentando resultados resistividade coerentes no ramo úmido da curva, mas muito variáveis no ramo seco da mesma. Foram realizados ensaios para entender o comportamento da sucção matricial e verificar a influencia da curva de retenção e da sucção na leitura da resistividade dos solos tropicais. Assim, foi possível verificar que a curva de sucção versus resistividade apresenta duas partes bem definidas: a primeira em que existe continuidade de água nos poros com resistividades menores e a segunda parte onde existe descontinuidade de água no solo apresentando um aumento considerável nas resistividades.

Dessa maneira, se pretende com o estudo em questão, contribuir para um melhor entendimento da caracterização geoambiental em solo não saturado obtida através do piezocone de resistividade.

Dando continuidade, foi avaliada a relação entre sucção e resistividade elétrica, envolvendo três diferentes solos e considerando, além da trajetória de secagem, a trajetória de umedecimento. Foram utilizados três solos: solo do Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru trata-se de uma areia argilosa de origem residual do Arenito Bauru; Argila arenosa residual de diabásio proveniente do Aeroporto Estadual de Piracicaba; e um solo retirado do processo erosivo ao longo do córrego Água Comprida classificado como areia fina com pouca argila.

Para os dois primeiros solos, como são utilizados como material de empréstimo, os ensaios foram realizados em corpos-de-prova compactados, na energia normal e no teor de umidade ótimo.

O terceiro solo foi estudado em amostra indeformada, retirado do processo erosivo ao longo do córrego Água Comprida, uma vez que nessa área estão sendo realizados vários ensaios RCPTu para caracterização do solo da região visando uma possível aplicação para erosão.

Nesse sentido, a presente pesquisa relata um estudo, em laboratório, utilizando três solos, observando-se o valor de resistividade elétrica em diferentes sucções, visto que, este fenômeno também é influenciado por algumas variáveis, tais como, a mineralogia, a massa específica, a porosidade e a concentração de água.

Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica, capítulo 3, abordando os principais assuntos relacionados à pesquisa, como: uma introdução do conceito de resistividade e eletricidade, informações relacionadas à leitura de resistividade elétrica em laboratório e os principais fatores que influenciam essa leitura; uma breve introdução sobre solos não saturados, curva de retenção de água e sucção, finalizando com a influencia da sucção nas leituras de resistividade elétrica.

No capítulo 4 estão apresentados as amostras e locais de retirada, os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios e os procedimentos para a realização destes ensaios.

Na sequência, capítulo 5, foram apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados, como: caracterização das amostras, curvas de compactação, ensaios de azul de metileno, ensaios de permeabilidade, as curvas de retenção de água no solo, as curvas obtidas no ensaio de Resistividade elétrica e as análises relacionando os resultados.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas e as recomendações para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação de Mestrado é verificar a influência que a sucção, presente em solos não saturados, têm sobre os valores de resistividade/condutividade, além de analisar as curvas de retenção de água dos solos obtidas pelas diferentes trajetórias. Assim, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Comparar as curvas de retenção de água dos três solos estudados após a realização dos ensaios através do Método do Papel de Filtro utilizando as trajetórias de secagem e umedecimento;
- Analisar os valores de resistividade nos pontos obtidos durante a obtenção da curva de retenção de água no solo observando a influência do teor de umidade e grau de saturação;
- Analisar os resultados de resistividade elétrica e sucção matricial considerando as duas trajetórias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais assuntos relacionados à pesquisa. Inicialmente, uma breve introdução do conceito de resistividade e eletricidade, logo em seguida 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.

Na sequência 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.

3.1 Resistividade Elétrica

A resistividade é uma característica do material, equação 3.1, que constitui um meio condutor e independe da sua forma geométrica, ou seja, a resistividade é uma característica intrínseca de cada material. Para Pacheco (2004), o valor da resistividade do solo é afetado pela sua composição trifásica de sólido, líquido e gás.

Fisicamente, a resistividade elétrica é definida como a medida de quão bem a corrente elétrica passa pelo solo (Perez *et al.*, 2009), isto é, quanto maior a resistividade elétrica de um solo, menor a quantidade de elétrons que passará por ele.

$$\rho = R \cdot A / l \quad (3.1)$$

Em que:

ρ : resistividade elétrica (ohm-m);

R : resistência elétrica (ohm);

A : área da seção transversal (m²);

l : comprimento (m).

Assim, a resistividade elétrica (de unidade usual $\Omega.m$) ou condutividade elétrica (mensurada geralmente em $\mu S/cm$) é medida por um par de eletrodos montados no fuste do cone e se relacionam de acordo com a equação 3.2:

$$Condutividade \left(\mu S/cm \right) = 10\,000 / Resistividade (\Omega.m) \quad (3.2)$$

A resistência elétrica, diferentemente da resistividade elétrica, depende de aspectos geométricos do condutor e, de acordo com a Primeira Lei de Ohm, pode ser calculada através da equação 3.3:

$$R = V / i \quad (3.3)$$

Sendo:

V : a voltagem medida em um par de eletrodos;

i : uma corrente elétrica contínua que alimenta os eletrodos.

A definição de resistência elétrica se aplica quando ocorre a circulação de uma corrente elétrica contínua através da aplicação de uma diferença de potencial entre os extremos de um resistor. Nesse sentido, qualquer material pode ser considerado um tipo de resistor, sendo que materiais que possuem resistência muito alta ao fluxo de corrente elétrica são classificados como isolantes.

A corrente elétrica i é definida como sendo a taxa de passagem de carga através da área da seção de um condutor. Assim, para uma variação de carga Δq que passa por uma determinada área A , num dado intervalo de tempo Δt , tem-se a equação 3.4:

$$i = \Delta q / \Delta t \quad (3.4)$$

O fenômeno da condução elétrica depende do meio no qual se propaga a corrente elétrica. Em meios aquosos, também designados meios ideais, essa propagação ocorre uniformemente formando linhas equipotenciais esféricas, ou seja, não há barreiras físicas que alterem a trajetória dos elétrons. Para meios particulados, como é o caso de solos, há vários fatores, como a composição trifásica do solo e a condutividade do fluido intersticial, que alteram a trajetória dos elétrons e, por consequência, acabam distorcendo as linhas equipotenciais. Na **Figura 3.1** tem-se a representação esquemática das linhas equipotenciais desenvolvidas pelo cone resistivo em meios aquosos e particulados.

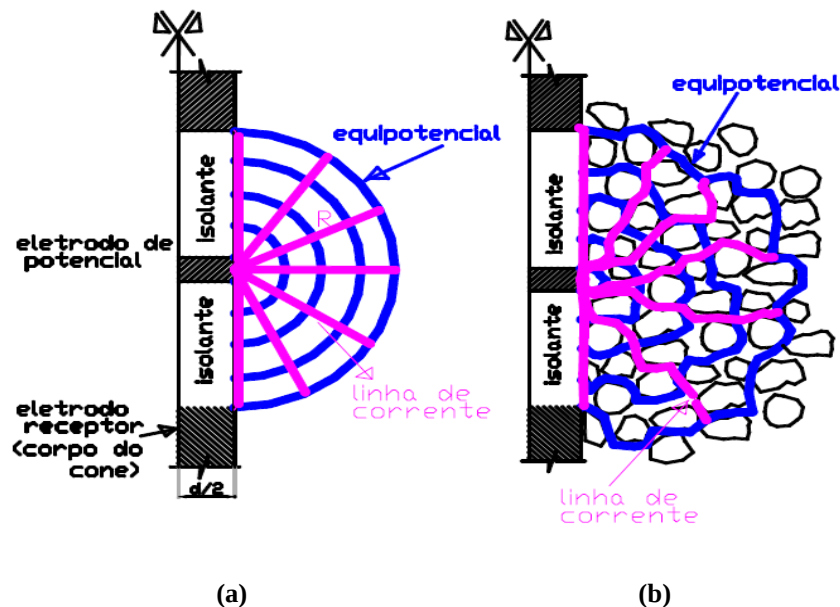


Figura 3.1 - Representação esquemática do desenvolvimento das linhas de campo e de corrente. (a) no modelo idealizado – meio aquoso, (b) em meio particulado – solo. (Fonte: Pacheco, 2004)

3.1.1 Resistividade Elétrica em Solos

Por definição, a resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca de um material homogêneo. No entanto, o solo é, geralmente, uma complexa distribuição de diferentes materiais com resistividades diferentes.

Para a interpretação dos resultados de resistividade elétrica, o solo deve ser considerado como 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, LUNNE *et al.*, 1997). O tipo de líquido é, portanto, uma variável extremamente importante para a interpretação de resultados medidos.

Na **Tabela 3.1** está resumida a influência de alguns parâmetros geotécnicos do solo na resistividade elétrica, segundo Razali e Osman (2001). Outras propriedades como porosidade, arranjo mineral, porcentagem de metal e granulometria também afetam o fluxo de corrente.

Tabela 3.1 – Tendência da resistividade em relação as diferentes características do solo (Razali & Osman, 2011).

Características do Solo	Resistividade ρ_b
Umidade ↓	ρ_b , ↑
Energia de compactação ↑	ρ_b , ↓
Massa Específica ↑	ρ_b , ↑
Massa Específica Seca ↑	ρ_b , ↑
Ângulo de Atrito ↑	ρ_b , ↑
Coesão ↑	ρ_b , ↑

Shihada *et al.* (2013) utilizou a resistividade elétrica para estimar o teor de umidade de um aterro Municipal no Texas e concluiu que devido aos vários fatores que afetam a resistividade, seria necessário o desenvolvimento de um modelo que considerasse todos os fatores simultaneamente.

Segundo Kalinski & Kelly (1993), as medidas de resistividade elétrica podem fornecer um meio não destrutivo, para avaliar a qualidade das camadas compactadas do solo. Alta resistividade pode ser um indicativo de baixo teor de água, de alta porosidade, ou alto teor de areia ou cascalho.

Assim, é necessário um estudo aprofundado sobre os fatores intervenientes na resistividade do solo, sendo que a seguir estão apresentados alguns desses fatores:

Tipo de solo:

Molin (2011), em seus estudos, verificou que a condutividade elétrica responde às variações na textura do solo e nos seus teores de umidade, indicando que ela tem potencial para ser utilizada na obtenção de dados para a caracterização física dos solos como uma solução de baixo custo.

Assim, o tipo de solo tem influência sobre a resistividade medida, principalmente, devido à forma dos grãos. Quanto maior o índice de vazios maior é a área para passagem de corrente. Assim, um material em diferentes índices de vazios teria maior condutividade quanto maior este parâmetro se apresente. (PACHECO, 2004)

Porém, 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 condutor 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. 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).

Por outro lado, Rømoen *et al* (2010) apresentou valores obtidos em sedimentos marinhos da Noruega através de ensaios RCPTU e ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Os autores concluíram que não é possível a caracterização do solo com base apenas nos valores de resistividade, mas são esperados valores menores de resistividade para aqueles não intemperizados, como apresentado na **Figura 3.2**.

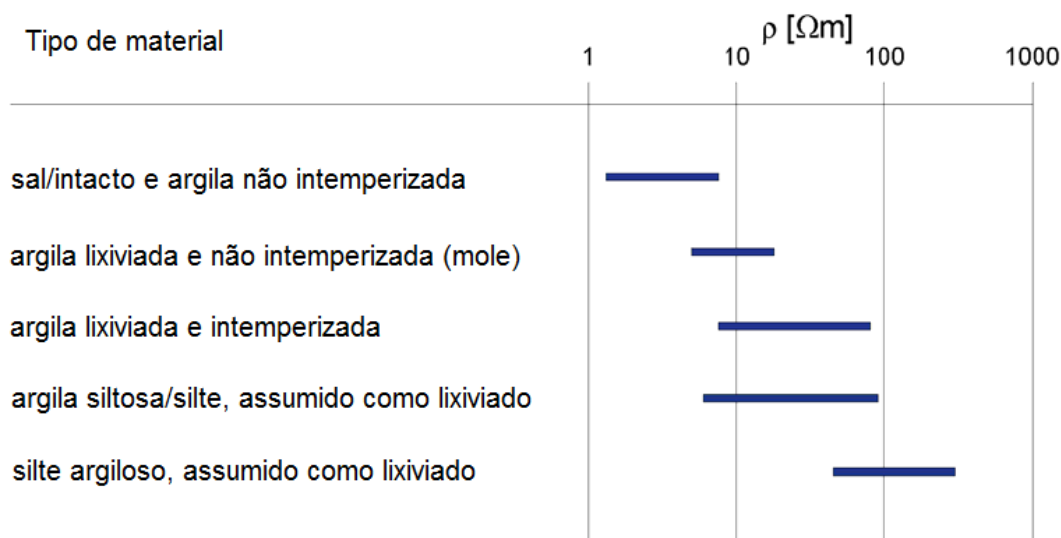


Figura 3.2 - Resumo dos valores de resistividade elétrica para os cinco locais estudados por Rømøen *et al* (2010)

Segundo Campanella & Weemeees (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.

Mais recentemente, Long *et al.* (2012) estudaram a relação entre a resistividade elétrica e os parâmetros geotécnicos básicos para argilas marinhas. Nessa pesquisa foram realizados ensaios no sul da Noruega, utilizando o método de ERT. Os resultados foram obtidos na escala bidimensional, os quais foram tratados e convertidos para valores unidirecionais de resistividade elétrica em função da profundidade e analisados em função da posição de perfuração. Nos locais de sondagem foram realizados também amostras de pistão para a obtenção dos parâmetros geotécnicos para a mesma profundidade estudada pelo ERT, o que permitiu a comparação entre os resultados.

Foi verificada uma relação forte entre estas duas propriedades, isto é, a resistividade elétrica diminui com o aumento do teor de argila. Esse comportamento é esperado porque as partículas de

argila facilitam a condutância de corrente elétrica em sua superfície. Em locais onde a quantidade de argila é baixa, os resultados apresentaram valores elevados de resistividade (LONG *et al* 2012).

Teor de Íons no Fluido Intersticial:

A quantidade de compostos iônicos presente no fluido intersticial determina sua resistividade elétrica, e um acréscimo no teor de íons ou na quantidade de sólidos dissolvidos no fluido intersticial produz um decréscimo na sua resistividade elétrica. Caso contrário, se um contaminante isolante está presente no fluido intersticial, ocorre um acréscimo na resistividade elétrica deste.

Segundo estudos realizados por Boszczowski (2008), em amostras deformadas, a resistividade do solo está relacionada com a quantidade dos principais íons presentes no solo (cloreto, fluoreto, nitrito, brometo, nitrato, fosfato e sulfato).

Yamasaki *et al* (2012) obteve a resistividade variando a salinidade do fluido através da adição de NaCl (cloreto de sódio) em dois tipos de solo, uma areia argilosa, resultante de um colúvio na bacia sedimentar do Paraná, região de Bauru (Amostra A); e uma argila pouco arenosa, residual de Diabásio (Amostra B), proveniente do município de Piracicaba. Descartando-se os resultados para água. Verifica-se que não existe mudança no fator de formação, FF, para o solo arenoso, independente do fluido. Isso ocorre porque o solo arenoso é basicamente composto por quartzo, que é um material praticamente inerte e nesse caso, a resistividade do solo é basicamente governada pela resistividade do fluido. Por outro lado, no solo argiloso observa-se um aumento no FF com o aumento de sais no fluido mostrando que os íons da solução reagem com os íons da superfície dos argilos-minerais envolvidos, diminuindo a condutividade elétrica (ou aumentando a resistividade) do solo. Os resultados assim obtidos estão apresentados na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 - Resumo dos resultados de Yamasaki *et al* (2012).

Solo	Fluido	$\rho_{\text{sat}} (\Omega.m)$	$\rho_w (\Omega.m)$	FF _{médio}
Arenoso	Água destilada	680.37	10000.00	0.07
	Água de abastecimento	577.26	74.87	7.71
	250 PPM	146.39	19.11	7.67
	500 PPM	71.05	9,75	7,28
Argiloso	Água destilada	52,50	10204,08	0,01
	Água de abastecimento	39,55	74,91	0,53
	250 PPM	36,76	19,16	1,92
	500 PPM	25,22	9,72	2,60

Long *et al.* (2012) mostraram a relação entre a resistividade elétrica e quantidade de sal do fluído. Há uma forte ligação entre esses parâmetros, isto é, a resistividade elétrica decresce rapidamente com o aumento do teor de sal e se torna constante quando a quantidade de sal excede aproximadamente 8 g/L.

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), equação 3.5.

$$\rho(T) = \rho(18^\circ) / 1 + \alpha(T - 18^\circ) \quad (3.5)$$

Onde: $\rho(18^\circ)$ representa a resistividade a 18 Celsius;

α : coeficiente experimental cujo valor típico é de $0.025 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

T: temperatura em $^\circ\text{C}$.

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

Para Kishimoto (2011), a resistividade elétrica da solução salina diminui com o aumento da temperatura, ou seja, a condutividade desse meio aumenta. Ensaios realizados para a concentração de 1 ppm de sal de cozinha (NaCl), a variação absoluta da resistividade elétrica no

intervalo de temperatura de 10 a 30°C foi de $\Delta\rho=1600\text{ohm.m}$ em relação a inicial de 10°C, sendo que para 10.000 ppm foi de $\Delta\rho=0,25\text{ ohm.m}$. Esses valores 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.

Sendo assim, independentemente da concentração de sal (NaCl) diluído na água, a variação da resistividade elétrica da solução, em porcentagem, é a mesma para as diferentes concentrações. Por outro lado, em valores absolutos, nas concentrações altas a variação da temperatura influencia cada vez menos no valor médio de resistividade elétrica obtida, enquanto que para concentrações baixas, essa mudança na temperatura, que está associada ao movimento aleatório das partículas que compõem o sistema, atua substancialmente na medição da resistividade elétrica a uma temperatura qualquer no intervalo de 10 a 30°C.

Em seus resultados, Kishimoto (2011) verificou que o coeficiente de temperatura para soluções salinas é de $\alpha = 2,07\text{ \%/}^\circ\text{C}$, ou seja, a resistividade elétrica varia 2,07 % com a diferença de 1°C do meio aquoso, valor próximo dado pelo laboratório ELGA LabWater para a água tratada da rede de alimentação com $\alpha=2,0\text{ \%/}^\circ\text{C}$.

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.

Índices de Vazios:

O índice de vazios (e) é um dos parâmetros do solo diretamente proporcional ao volume de vazios (V_v), expresso pela equação 3.6.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.6)$$

Em que: V_v é o volume de vazios composto pela soma do:

Var: Volume de Ar; V_a : volume de água (V_a); e V_s é o volume de sólidos.

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. Em que observou 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 3.3**.

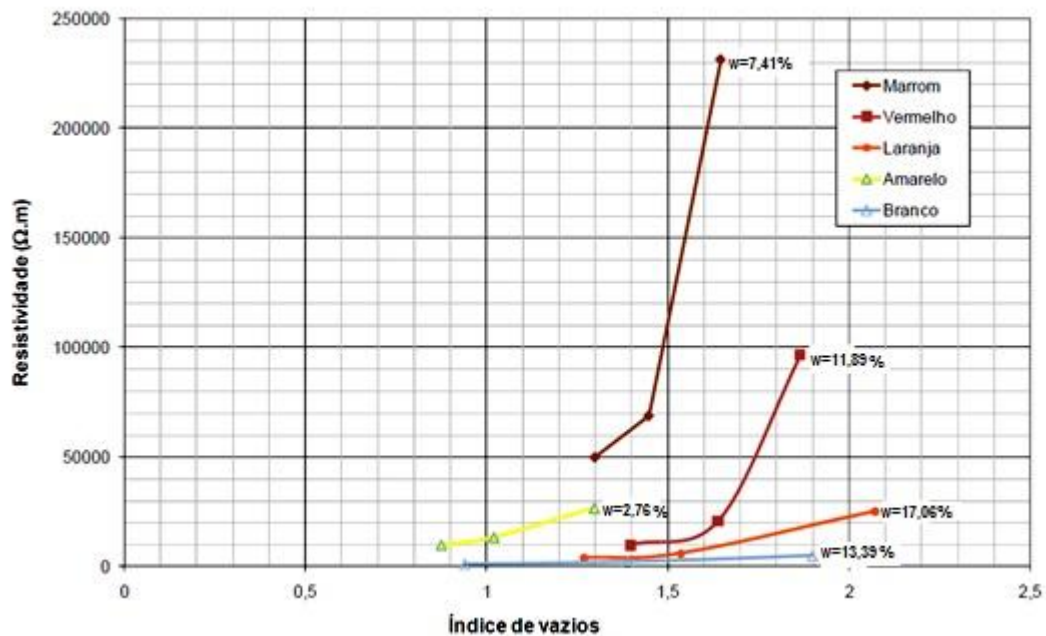


Figura 3.3 - Relação entre Resistividade e Índice de vazios para amostras deformadas, mantendo-se o teor de umidade constante. (BOSZCZOWSKI, 2008)

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.

Teor de Umidade:

Em sua pesquisa, Boszczowski (2008) verificou 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. Esse decréscimo está relacionado com

a condutividade elétrica do material, que é função do teor de umidade, fator diretamente relacionado com a solubilidade dos sais existentes.

Pozdnyakov *et al* (2006) sugeriram como apropriado o modelo exponencial para descrever a relação entre a resistividade elétrica e o teor de umidade. Porém, atentaram para o fato de que os parâmetros do modelo exponencial devem ser diferentes em função dos intervalos de umidade referentes aos diferentes mecanismos de retenção de água. Teoricamente, a relação encontrada entre a resistividade elétrica e o logaritmo do teor de umidade é representada em uma série de segmentos de reta, como apresentado na **Figura 3.4**.

Segundo Yamasaki *et al.* (2014), Aumentando o teor de umidade nos ensaios de compactação ocorre uma diminuição da resistividade até que o equilíbrio é atingido quando o grau de saturação é superior a 80%. Por outro lado, sobre os pontos a seco da curva de compactação, resistividade aumentou em função da quantidade de vazios, pois o ar nos poros atua como um isolante e que interrompe o fluxo contínuo de corrente.

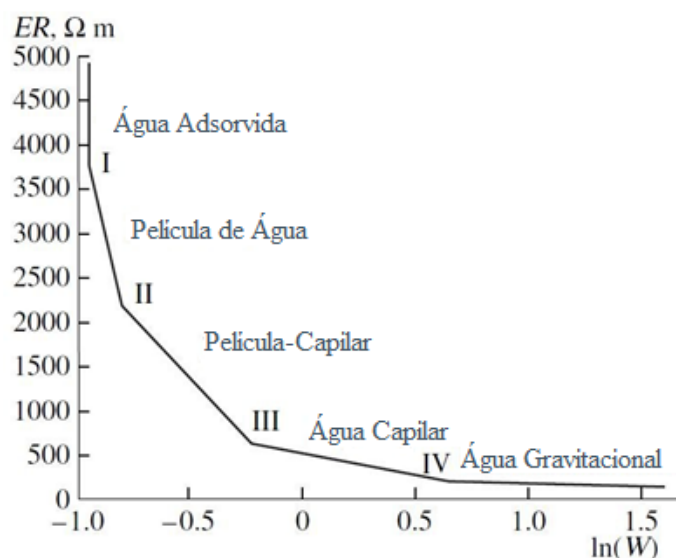


Figura 3.4 - Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade para diferentes fases de retenção da água (adaptado Poznyakov *et al*, 2006)

Sucção:

Todos os parâmetros que influenciam a resistividade elétrica dos solos como estrutura, mineralogia e composição, influenciam também a sucção dos solos (BOSZCZOWSKI, 2008).

Em estudos realizados por Oh *et al.* (2008) e Boszczowski (2008), concluíram 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 corroborando Yamasaki *et al* (2010) que trabalhou com amostras compactadas, **Figura 3.5**.

Beck *et al* (2011) estudou uma série de parâmetros onde a relação entre resistividade e massa específica aparente seca se apresentou bastante linear para dados teores gravimétricos de água. Outro ponto levantado é que a sensibilidade correspondente diminui à medida que o teor de água aumenta até chegar a uma constante acima de um teor de água "crítico". Para o solo testado por Beck *et al* (2011) este teor de água crítico fica perto do teor de umidade ótima no Proctor Normal , corroborando com Yamasaki *et al* (2010).

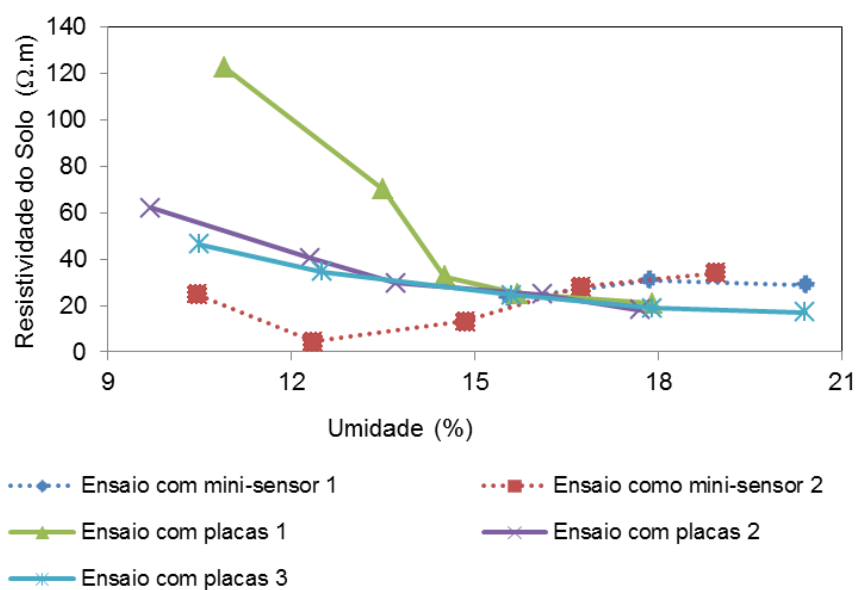


Figura 3.5 - Resultados dos dois métodos para obtenção da resistividade elétrica em ensaios de compactação (adaptado de Yamasaki *et al*, 2010)

Fator de Formação:

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 fluído intersticial (ρ), a porosidade do solo (n) e o grau de saturação (S).

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \cdot Sr^{-b} \quad \text{Para solos não saturados} \quad (3.7)$$

$$\rho_b = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m} \quad \text{Para solos saturados} \quad (3.8)$$

Em que: ρ_b : resistividade do solo;

ρ_w : resistividade do fluído;

n : porosidade do solo;

Sr : grau de saturação;

a , b e m são constantes que dependem do tipo de solo.

O “fator de formação” (FF) é um parâmetro adimensional, também conhecido como fator de forma, equacionado pela razão entre a resistividade aparente do solo (ρ_b) e a resistividade do fluído intersticial (ρ_f), equação 3.9 (PACHECO, 2004).

$$FF = \frac{\rho_b}{\rho_f} \quad (3.9)$$

Esse termo está relacionado com a forma dos grãos, admitindo-se que a condução elétrica varia exclusivamente em função da geometria dos poros formados entre os grãos e, consequentemente, a mineralogia. De acordo com Weemees (1990), se considera fundamental que não exista condução elétrica pelas partículas. No caso de solos com quantidades significativas de argilominerais, que podem conduzir carga elétrica, a realização de medidas de resistividade não distingue os fenômenos de condução, assim, a resistividade mensurada leva em consideração um fator de forma aparente.

Dentre as diversas formulações para o fator de formação a mais simples é a Lei de Archie. Nessa formulação assume-se que a resistividade do fluído intersticial, a porosidade do solo e o grau de saturação são os três fatores dominantes impactantes na resistividade dos solos granulares. Considera-se, também, que a resistividade do solo é diretamente proporcional à resistividade elétrica do fluído intersticial e à geometria dos espaços vazios no solo (ou rocha).

A equação 3.10 pode ser considerada como uma simplificação da relação entre a resistividade aparente do solo e a resistividade do fluído intersticial, somente válida quando a resistividade do fluído intersticial é baixa e existe apenas uma pequena quantidade de argilominerais. Essa condição é estabelecida porque a resistividade aparente do solo é função da geometria dos poros e da resistividade do fluído intersticial (OLIVEIRA, 2004).

$$FF = \frac{\rho_b}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \cdot Sr^{-B} \quad (3.10)$$

Na qual FF é o fator de formação, ρ_b é a resistividade aparente do solo, ρ_f é a resistividade do fluído intersticial, a é uma constante dependente da porosidade do solo, m é uma constante dependente da cimentação entre as partículas, B é uma constante do solo determinada experimentalmente, n é a porosidade e Sr é o grau de saturação.

Aplicando o modelo de Archie (1942) para solos saturados, a equação sofre uma simplificação ($Sr = 1$), resultando na equação 3.11.

$$FF = \frac{\rho_b}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \quad (3.11)$$

O fator escala da equação, a , 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, e m depende do tipo de solo. Para areias $m=1,5$ e para as argilas o valor m varia de 1,8 a 3,0 (JACKSON *et al.*, 1978).

No caso de solos granulares (areias), a influencia da matriz sólida na resistividade do solo pode ser desprezada, restando apenas a porosidade e a química do fluído intersticial como fatores

relevantes; visto que as partículas sólidas e o ar dos solos granulares, com baixa quantidade de finos, se comportam como materiais isolantes.

Waxman e Smits (1968) desenvolveu um modelo físico simples que relaciona a condutividade elétrica da areia argilosa saturada para a condutividade e da capacidade de troca catiônica por unidade de volume de poros. Eles assumiram que a corrente elétrica associada com íons da argila percorre o mesmo caminho tortuoso da corrente elétrica associada a íons na água intersticial. Deste modo, x e y são considerados iguais e por analogia a Archie (1942) em relação areias limpas:

$$C_o = xC_e + yC_w \quad (3.12)$$

Onde C_o , C_e and C_w são a condutância específica (condutividade) do núcleo, Troca catiônica da argila e Equilíbrio da solução de sal, respectivamente; x e y são constantes geométricas.

$$x = y = 1/F^* \quad (3.13)$$

Onde F^* é o fator de resistividade de formação da areia argilosa

$$C_o = (1/F^*) \times (C_e + C_w) \quad (3.14)$$

Para areias puras $C_e=0$ segundo Waxman and Smits (1968) e F^* reduz a FF , o fator de resistividade formação habitual:

$$F^* = FF = C_w/C_o \quad (3.15)$$

ou na resistividade elétrica:

$$FF = \rho_{sat}/\rho_w \quad (3.16)$$

Onde: FF é a areia limpa formação resistividade acordo Archie (1942), ρ_{sat} é a resistividade de areia quando todos os poros são cheios com solução salina e ρ_w é a resistividade da solução salina.

Recentemente Peixoto *et al.* (2014) estudaram o fator de formação em uma areia argilosa, solo 1, e argila arenosa, solo 2, a partir de ensaios de permeabilidade com diferentes concentrações dos fluídos de percolação, **Tabela 3.3 e 3.4**. O resultado do fator de formação F^* , calculado por Waxman e Smits (1968) resultou em 7,0, bastante semelhante ao calculado pela Lei de Archie (FF),

mostrando a aplicabilidade da Lei de Archie no solo arenoso. No entanto, na argila arenosa, os resultados de ambos os modelos são diferentes, mostrando a interferência da condutividade da superfície específica dos minerais de argila.

Tabela 3.3: Solo 1 (Areia Argilosa) - Resistividade do solo saturado (ρ_{sat}), condutividade elétrica da água (C_w), resistividade da água no fluido de percolação (ρ_w), fator de formação da lei de Archie (F) (Peixoto *et al.*, 2014).

Concentração	ρ_{sat} ($\Omega.m$)	C_w ($\mu S/cm$)	ρ_w ($\Omega.m$)	F	F*
Água destilada	680,37	1,00	10000,00	0,07	7,02
Água de abastecimento	577,26	133,6	74,87	7,71	
250ppm	146,39	523,5	19,11	7,67	
500ppm	71,05	1025,7	9,75	7,29	

Tabela 3.4: Solo 2 (Argila Arenosa) - Resistividade do solo saturado (ρ_{sat}), condutividade elétrica da água (C_w), resistividade da água no fluido de percolação (ρ_w), fator de formação da lei de Archie (F) (Peixoto *et al.*, 2014).

Concentração	ρ_{sat} ($\Omega.m$)	C_w ($\mu S/cm$)	ρ_w ($\Omega.m$)	F	F*
Água destilada	52,50	0,98	10204,08	0,01	4,65
Água de abastecimento	39,55	133,5	74,91	0,53	
250ppm	36,76	522,0	19,16	1,92	
500ppm	25,22	1029,0	9,72	2,60	

3.1.2 Resistividade Elétrica em Laboratório

Para determinar a resistividade elétrica do solo, deve-se levar em considerações 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.

Existem diversos métodos e dispositivos para realizar a leitura em laboratório. 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 3.6**, 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 possibilitam obter a voltagem no interior da mesma, tornando possível a medida da resistividade da amostra de solo. A resistividade assim obtida está demonstrada na equação 3.17:

$$\rho_0 = \frac{W.H.R}{L} \quad (3.17)$$

Em que: ρ_0 : resistividade da amostra (ohm.cm);

W: largura da caixa (cm);

H: altura da caixa (cm);

R: resistência medida (ohm);

L: distância interna entre os pinos (cm).

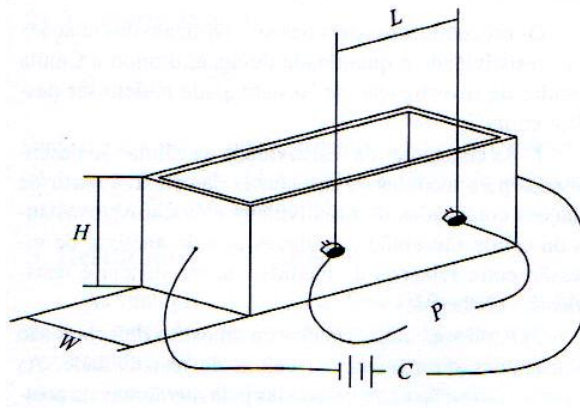


Figura 3.6 - Esquema geral da caixa de solo Miller *apud* Paz e Campelo (2005)

Em razão à geometria da caixa, a resistividade da amostra, que é expressa em ohm-cm, é igual à medida de resistência em ohms, ou seja, a resistividade é numericamente igual à resistência do solo, quando considerado um cubo de solo de aresta de 1cm, equação 3.18:

$$\rho_0 = \frac{W.H.R}{L} = \frac{1.1.R}{1} \rightarrow \rho_0 = R \quad (3.18)$$

O ensaio da Célula Circular de Investigação de resistividade é feito com uma célula circular de material isolante, com oito eletrodos igualmente espaçados inseridos na lateral da amostra, **Figura 3.7.**

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, é possível a obtenção de 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.

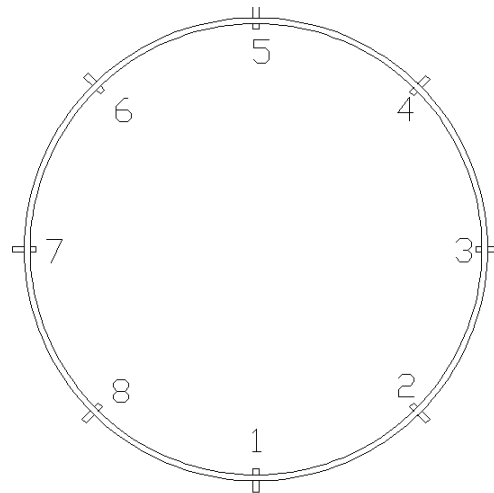


Figura 3.7 - Vista superior da célula de resistividade.

Para o cálculo da resistividade usa-se a média dos oito valores de resistência, conforme a equação 3.19:

$$\rho_0 = f(Rk_1 + k_2) \quad (3.19)$$

Em que: ρ_0 : resistividade da amostra (ohm.m);

R: média das medidas de resistência da amostra (ohm);

f : fator de correção de temperatura;

k_1 : constante da célula (m);

k_2 : constante da célula (ohm.m).

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 amostras desestruturadas, o solo destorreado foi colocado em uma caixa padrão, Soil Box, de dimensões 120mm de comprimento, 50mm de altura e 50mm de largura, **Figura 3.8**. As laterais de dimensões menores foram feitas de material acrílico e as maiores, feitas de cobre onde foram fixados cabos para a passagem da corrente elétrica. A resistência foi obtida através da equação 3.17.

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 lado do tubo foi colocada uma placa de bronze e aplicada à diferença de potencial seguindo a configuração da **Figura 3.9**.



Figura 3.8 - Ensaio para determinação da resistência elétrica em amostras deformadas, Soil Box *apud* Boszczowski (2008)

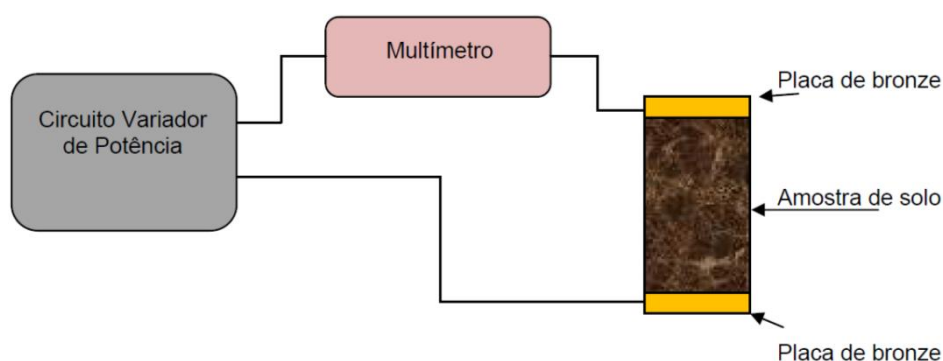


Figura 3.9 - Desenho esquemático do ensaio de resistividade elétrica *apud* Boszczowski (2008)

Para a primeira determinação da resistência, os corpos de prova foram secos ao ar e para as demais, os mesmos foram umedecidos e deixados em repouso por dois dias antes das leituras.

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 3.10**. 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.

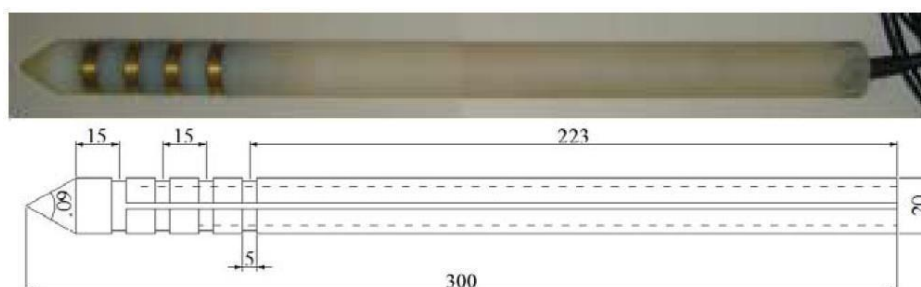


Figura 3.10 – Mini-sensor de resistividade (PEIXOTO *et al.*, 2010)

Com a finalidade de comparar os valores calculados de resistividade com o mini-sensor (**Figura 3.10**), Yamasaki *et al.* (2010) realizaram inicialmente ensaios utilizando duas placas circulares de cobre posicionadas cada qual em uma extremidade do corpo de prova. O ensaio foi realizado para corpos de prova compactados 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 3.11** e o sistema do ensaio com o dispositivo de resistividade elétrica com configuração semelhante a do piezocone de resistividade pode ser observada pela **Figura 3.12**.



Figura 3.11 - Configuração do Ensaio com as Placas de Cobre (YAMASAKI *et al*, 2010)

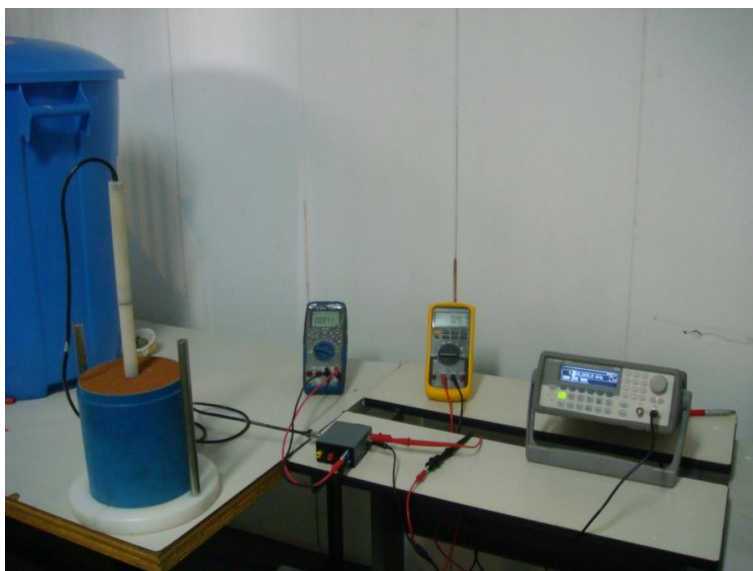


Figura 3.12 - Configuração do ensaio de resistividade com o mini-sensor (YAMASAKI, 2010)

Por meio desse estudo Yamasaki *et al.* (2010) concluíram que, de uma maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios no ramo úmido da curva de compactação 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.

Um método direto, para leituras em campo, é o piezocone de resistividade que é um equipamento de ensaio de penetração quasi-estática in situ que permite identificar o perfil

estratigráfico do terreno e avaliar preliminarmente os parâmetros geotécnicos do solo. Para a realização de leituras de resistividade elétrica no campo, um acessório acoplado ao piezocone interessante para aplicação geo-ambiental é o sensor de condutividade elétrica, que fornece a resistividade [$C (\mu S/cm) = 10000/ R (\Omega.m)$]. Essa medida foi inicialmente aplicada para estimativa da densidade de areias e mais recentemente tem sido utilizada como um indicativo de contaminantes no solo.

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

3.2 Solos Não Saturados

Historicamente, a Mecânica dos Solos Clássica tem estudado as características dos solos na condição saturada. No entanto, nas regiões de clima árido e tropical, os solos normalmente têm como característica principal a baixa umidade próxima à superfície podendo sofrer ciclos alternados de secagem e umedecimento. Em alguns desses solos, as principais características da variação da pressão de água num perfil representativo pode ser observado na **Figura 3.13**.(RODRIGUES, 2007).

Num solo não saturado, a presença de sólidos, de ar e de água faz com que ocorram diferentes interfaces e interações entre seus componentes. Na interface ar-água, moléculas são atraídas para o interior da massa líquida com maior intensidade. Dessa forma, tensões de tração, ou *tensão superficial* e atuam na superfície do líquido nessa interface, tornando-se côncava para o ar, indicando que a pressão nos dois fluidos não é a mesma, esta diferença de pressão é denominada *tensão de sucção*, é responsável por diversos fenômenos referentes ao comportamento mecânico

dos solos, entre eles a ascensão capilar e o comportamento dos solos não saturados quando solicitados por carregamento ou submetidos à infiltração de água (PINTO, 2006).

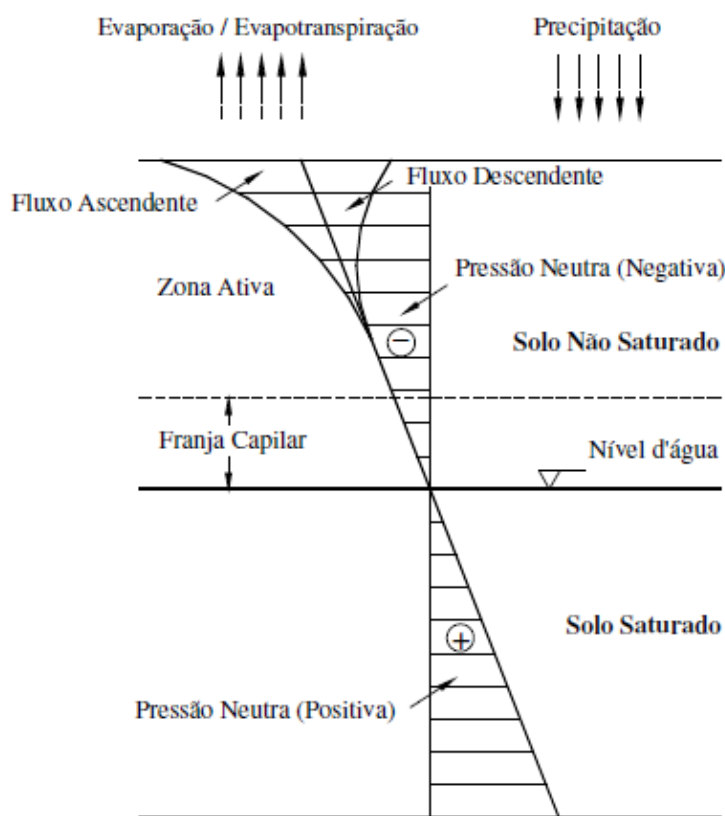


Figura 3.13 – Variação da pressão de água num perfil de solo. (RODRIGUES,2007.)

Vilar (2004) *apud* Rodrigues (2007) expõe que o comportamento dos solos não saturados sempre foi reconhecido no âmbito da mecânica dos solos. Porém, os princípios da mecânica dos solos foram estabelecidos para solos saturados. Algumas razões para este fato podem ser observadas, como: a mecânica dos solos evoluiu inicialmente nos países de clima temperado, onde os solos prevalecem saturados; a aceitação de que a condição saturada tende a ser mais crítica, estão entre algumas das razões.

Esse interesse pode ser justificado por dois motivos: o primeiro devido às obras geotécnicas envolvendo essa condição de não saturação, como aterros, barragens, estabilização de taludes, e até mesmo fundações; já o segundo é devido à grande presença desta condição em diversas regiões no planeta, como as regiões de clima árido e semiárido, que representam cerca de 60% dos países do

mundo, além dos países com clima tropical, onde ocorrem extensos períodos de seca, suficientes para dessaturar o solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Por outro lado as maiores ocorrências de solos não saturados estão em regiões menos desenvolvidas. Além da complexidade associada ao comportamento desses solos são fatores adicionais relevantes que contribuíram para retardar o desenvolvimento de teorias e aplicação de conceitos adequados.

Alguns pesquisadores tiveram papel importante no desenvolvimento de conceitos e técnicas para ensaios em solos não saturados, como: Buckingham – com a definição de potencial da água em 1907; Richards – desenvolvimento da equação de fluxo em solos não saturados em 1928 e a técnica do papel filtro em 1941 (DELAGE, 2002).

O principal parâmetro da mecânica dos solos não saturados é a sucção. Marinho (2005) define a sucção como sendo “a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação”. Em outras palavras, pode-se dizer que a sucção, expressa em termos de tensão, é a avidéz que o solo não saturado tem por água, a qual é utilizada para avaliar a capacidade que o solo tem em reter água.

Segundo Custódio *et al* (2004), o efeito da sucção total é conhecido amplamente no estudo comportamental dos solos, porém, os avanços de novas técnicas de ensaio de solos não saturados, a estrutura compressível do solo e o entendimento dos procedimentos laboratoriais ainda não são totalmente conhecidos.

A definição de energia para retirar água do solo, em um solo não saturado em termos de potencial equivalente é antiga na agronomia. Do ponto de vista geotécnico, Aitchinson (1965), por exemplo, define o potencial total como a soma dos termos: potencial osmótico, matricial, gravitacional, pneumático e de adensamento. Sendo os três últimos desprezados, pois não se aplicam a maioria dos casos (BOSZCZOWSKI, 2008).

3.2.1 Sucção

A sucção surge devido a condições físico-químicas, ou seja, as condições ambientais que o solo absorve ou perde água interferindo no grau de saturação. Pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial.

A sucção total é a soma de duas parcelas, sendo elas a matricial e a osmótica, e pode ser relacionada com a umidade relativa do ar por meio da Lei Psicrométrica:

$$\Psi = s + \pi = \frac{-RT}{V_w M_w} \ln \left(\frac{p_v}{p_{vs}} \right) \quad (3.20)$$

Em que: Ψ é a sucção total;

s é a sucção matricial;

π é a sucção osmótica;

M_w é a massa molecular da água (0,018 kg.mol⁻¹);

R é a constante de gases ideais (8,3143 J.mol⁻¹.K⁻¹);

T é a temperatura absoluta (K);

V_w é o volume específico da água;

p_v é a pressão parcial de vapor; e

p_{vs} é a pressão de vapor de saturação.

Das componentes da sucção total, a sucção matricial tem sido reconhecida como a que mais interfere no comportamento mecânico dos solos não saturados (ALONSO *et al.*, 1987).

Uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção de água, 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 (Presa, 1982). Essa curva permite obter a capacidade de retenção de água no solo (MIGUEL *et al.*, 2006).

A determinação das curvas de retenção de água pode ser feita em laboratório seguindo trajetórias de secagem ou de umedecimento por vários métodos.

Os valores de sucção correspondem ao tipo de solo, com uma densidade determinada, e a natureza dessa relação está diretamente associada a granulometria e a mineralogia do solo. De

forma geral, a geometria dos poros, a magnitude e composição mineralógica da fração fina são determinantes na composição da curva de retenção de água no solo (SOTO, 2007).

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

3.2.2 Curva de Retenção de água no solo

A curva de retenção descreve a relação entre a sucção e a quantidade de água no solo. Na literatura não existe uma padronização na forma de apresentação dessas curvas: a sucção aparece tanto em escala logarítmica como em escala linear; o conteúdo de água no solo pode ser expresso de diferentes formas como umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou grau de saturação.

A forma da curva de retenção depende da trajetória típica de ensaio, que são: secagem e umedecimento. Na secagem, a amostra é previamente saturada e submetida a potenciais matriciais crescentes, provocando redução da umidade do solo. Já no umedecimento, a amostra seca é submetida a potenciais matriciais decrescentes, promovendo aumento da umidade do solo (GEORGETTI, 2010).

A forma das curvas depende da trajetória do ensaio e a diferença entre as curvas de secagem e de umedecimento de um mesmo solo é chama histerese. Nota-se que a curva de secagem

apresenta umidades mais elevadas em relação à curva de umedecimento para uma mesma sucção. A histerese pode ser atribuída à geometria dos poros, variação de diâmetro dos poros, o aprisionamento de ar nos vazios, e às estruturas dos solos sujeitas à contração ou à expansão nas fases de secagem ou de umedecimento. (HILLEL, 1971)

A **Figura 3.14** ilustra os principais elementos de uma curva de retenção de água: as duas trajetórias típicas de ensaio, a umidade volumétrica de saturação (θ_s), a pressão de entrada de ar e a umidade residual (θ_r). A pressão de entrada de ar representa a pressão necessária para que se inicie o esvaziamento dos poros do solo. A umidade residual representa uma quantidade de água retida no solo que não varia mesmo com o aumento da sucção no solo.

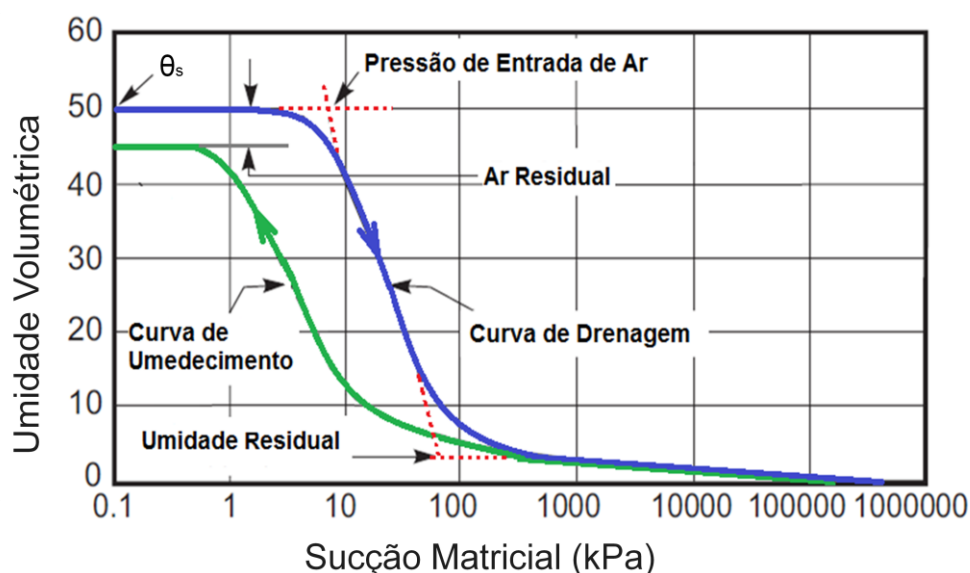


Figura 3.14 - Curva de retenção de água de um solo (adaptado de FREDLUND e XING, 1994)

As curvas de retenção de água, obtidas nas duas trajetórias, delimitam as condições de sucção do solo no campo. Assim, a determinação da curva de retenção de água em um solo é indispensável durante seu estudo (RODRIGUES, 2007).

Na **Figura 3.15**, são apresentadas algumas curvas de retenção de água representativas para solos argilosos e arenosos e para solos com distribuição de poros bimodal, isto é, solos que

apresentam duas classes de poros contrastantes, classificados em poros estruturais e texturais (DEXTER & RICHARD, 2009).

Caracterizados pelos macroporos formados pelos vazios entre grão e agregados e pelos microporos, formados no interior dos agregados. A curva de solo com distribuição bimodal de poros apresenta dois pontos de inflexão, isto é duas pressões de entrada de ar.

As características de posição, forma e inclinação da curva de retenção de água dependem basicamente da granulometria, estrutura e mineralogia do solo. A **Figura 3.16** ilustra os diferentes tipos de curvas de retenção de água de acordo com diferentes tipos de solos.

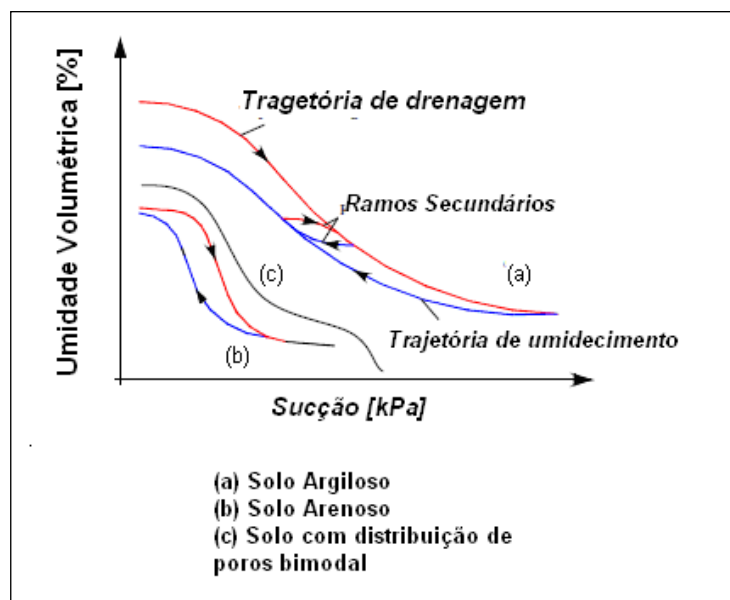


Figura 3.15 – Curvas de retenção de água no solo. (Fonte: Rodrigues,2007)

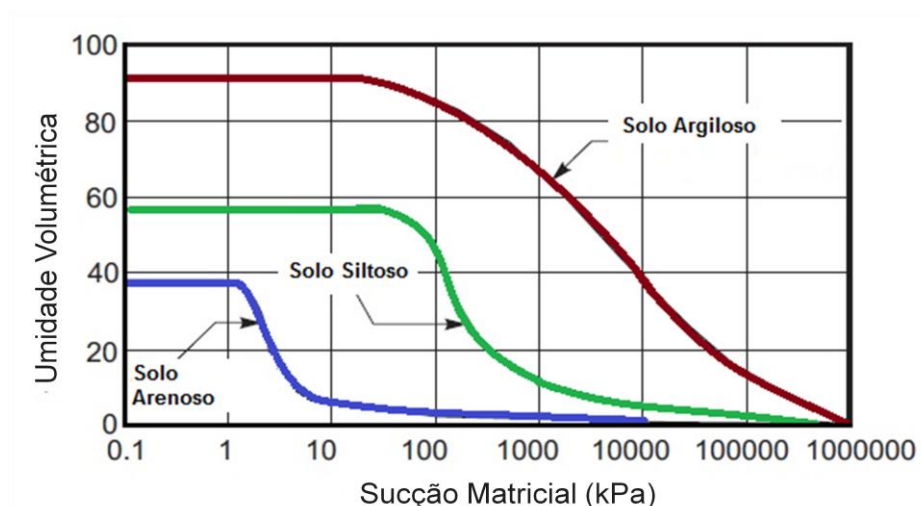


Figura 3.16 - Curvas de retenção de água no solo. (adaptado de FREDLUND e XING, 1994).

Existe uma grande variedade de métodos para a determinação da sucção. Dentre os principais métodos de laboratório tem-se: o método do papel filtro e a panela de pressão, os quais se diferem no tempo de resposta e na faixa de precisão associado a cada uma das técnicas. Na **Tabela 3.5** estão relacionadas às principais diferenças entre esses métodos.

Tabela 3.5 - Métodos de medida de sucção adaptado de Ridley & Wray (1995).

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

O método do papel de filtro baseia-se no princípio que dois materiais porosos quando colocados em contato irão ceder ou absorver água até que o equilíbrio entre os dois seja alcançado. Um solo, com alguma umidade, quando é colocado em contato com um papel filtro, com umidade menor, faz com que esse último adsorva certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de pressão. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso, ou seja, a curva de calibração, a sucção do solo pode ser obtida. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém valores de umidade diferentes. A sucção do solo é determinada colocando-se o papel de filtro em contato com o solo, para se medir a sucção matricial, ou colocando-se o papel filtro próximo ao solo, mas não em contato direto, para se determinar a sucção total (BOSZCZOWSKI, 2008).

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 3.6**. Esse método foi utilizado por Aquino (2010) e por Campos *et al* (2012) para avaliar o comportamento da resistividade elétrica frente a variação de secagem e umedecimento do solo.

Tabela 3.6- Curva de calibração para o papel filtro Whatman 42 (adaptado de BICALHO *et al.*, 2014).

Referencia	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
Marinho e Oliveira (2006)	Matricial e total	w<33	4,83-0,0839w
Marinho e Oliveira (2006)	Matricial e total	w>33	2,57-0,0154w

Observação: W = teor de umidade gravimétrica. (*) variação da sucção (80 – 6000 kPa)

3.2.3 Resistividade Elétrica e Sucção

Os valores de sucção correspondem ao tipo de solo, com uma densidade determinada, e a natureza dessa relação está diretamente associada à granulometria e a mineralogia do solo, assim como a resistividade elétrica do solo, além de estarem fortemente ligadas a quantidade de água presente neste solo. Por tanto é possível relacionar essas duas grandezas de forma a encontrar uma relação entre elas.

Assim, a resistividade dos solos diminui com o aumento do grau de saturação do material e aumenta com o aumento do índice de vazios. Ou seja, a presença de água favorece a condutividade elétrica e a presença de vazios a prejudica.

Aquino *et al* (2011) 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 a entrada de ar nos microporos, representa a perda da continuidade dos caminhos de água no solo promovendo o seu aumento brusco.

De acordo com Muñoz-Castelblanco (2011), pode-se dividir a curva de resistividade versus Sucção em duas partes: na primeira tem-se a continuidade da água nos poros e assim temos resistividades menores e a segunda onde as sucções são mais altas, e descontinuidade da água nos poros do solo assim apresentando um aumento considerável nos valores de resistividade.

Percebeu-se que, quando a resistividade aumenta, a sucção também aumenta para uma massa específica aparente seca constante. Agora, se a resistividade mantém um valor constante e a massa específica aparente seca é aumentada, a sucção tende a diminuir. Portanto, não há uma única relação entre resistividade e sucção e a maioria dos dados estudados em seu trabalho exibem dependência com a massa específica seca, o que significa que este parâmetro é muito sensível a muitos fatores, como o teor de água, massa específica aparente seca, temperatura, teor de sal, entre outros (PEREZ *et al.*, 2009).

Perez *et al.* (2009) estudaram a relação entre o efeito da sucção e da resistividade elétrica para três tipos de solos: silte de baixa plasticidade (ML), um silte plástico (MH) e uma argila plástica (CH), com as características apresentadas na **Tabela 3.7**. O estudo apontou para a necessidade de se isolar outros fatores intervenientes e a necessidade de se desenvolver mais estudos nessa área para a obtenção da relação entre a sucção e a resistividade elétrica.

Tabela 3.7 - Propriedades índices dos solos analisados (PEREZ *et al.*, 2009).

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

Piegari e Di Maio (2013) relacionaram a sucção do solo com a resistividade elétrica com o objetivo de obter informações sobre alterações de sucção do solo em grandes volumes, e não só para as pequenas áreas em torno de sondas de sucção do solo (Piezômetros). Utilizaram relações analíticas entre sucção matricial do solo e da resistividade elétrica combinando as leis empíricas de van Genuchten e Archie, mostrando que com o conhecimento preliminar do comportamento elétrico e a curva de retenção de água do solo investigado, é possível estimar a distribuição dos valores de sucção utilizando métodos.

Outro exemplo a ser citado é o de De Vita *et al.*(2012), que utilizou a relação entre a resistividade elétrica juntamente com as curvas de retenção de água obtidas experimentalmente em laboratório para possibilitar o monitoramento de uma região de testes no Sul da Itália, **Figura 3.17**.

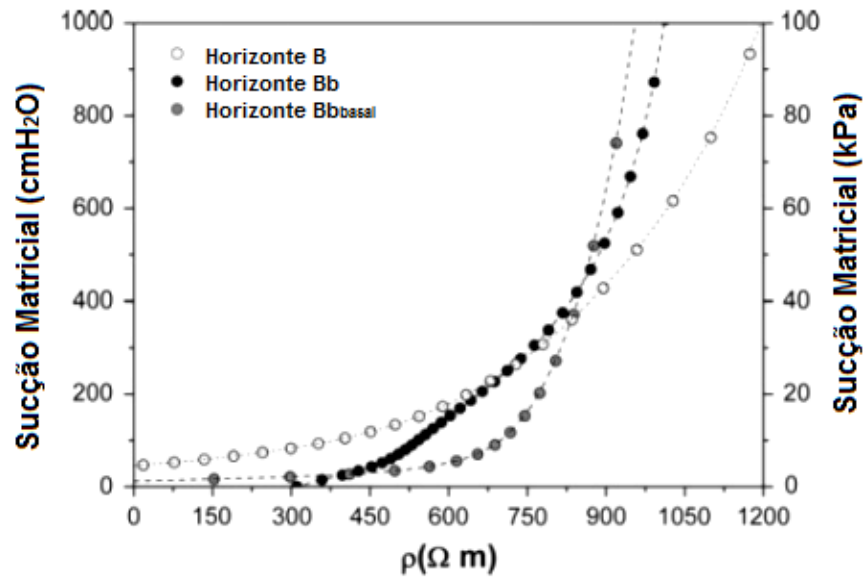


Figura 3.17 – Sucção matricial do solo em função da resistividade elétrica. (DE VITA *et al*, 2012)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo 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 às amostras bem como os resultados obtidos.

4.1 Solos utilizados

A escolha das amostras para realização dessa dissertação foi baseada nos estudos já realizados por outros autores, uma vez que visa proporcionar a avaliação da medida da resistividade em amostras de solos diferentes. Os solos foram coletados em dois locais em Bauru e um local em Piracicaba, **Figura 4.1**

A cidade de Bauru se encontra dentro da Bacia Bauru, Grupo Bauru em que se encontra a formação Marília, que se caracteriza por: arenito grosso a fino, jovem, amarelo e vermelho, conglomerático com clastos arenosos e de calcário fino; arenito fino a médio, jovem, com fração subordinada de areia grossa e grânulos; ambiente continental desértico, leque aluvial médio a distal (CPRM, 2006).

A cidade de Piracicaba se encontra localizada dentro da bacia do Paraná, no grupo Passa Dois onde se encontra a formação Corumbataí, que se caracteriza por: Siltito argiloso, folhelho siltico e raro arenito, calcário micritico e microesparítico, maciço ou laminado; sucedido por arenito, interlaminação entre arenito, siltito e argilito, siltito e siltito arenoso, calcáreo micritico e marga; ambiente marinho de costa-afora a transicional entre costa-afora e face de praia (CPRM, 2006).

SOLO A - Processo erosivo no córrego Água comprida

A amostra aqui denominada como Solo A foi coletado no dia 10 de Novembro de 2013 e próximo ao acesso do condomínio Chácara Odete, Avenida Antenor de Almeida, Bauru/SP, **Figura 4.2**. O solo A é uma areia pouco argilosa, aluvionar, proveniente de uma erosão fluvial de Bauru e foram retiradas a uma profundidade de 1m.

SOLO B - Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru

A coleta das amostras do solo B (areia argilosa) foi realizada no dia 20 de abril de 2011 no talude ao norte do Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru/SP, próximo ao local de coleta da pesquisa de mestrado de Yamasaki(2010), com coordenadas no Sistema Datum South América 69: 22°15'13,0" Sul e 49°08'16,6" Oeste com erro de $\pm 5m$. Na Figura é mostrado o talude de onde foram coletadas as amostras de solo com teor de umidade de 6,9% no momento da coleta, **Figura 4.3**.

MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO

ESCALA 1:750.000
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Km
VERSÃO 2.0
2006

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
Silas Rondeau Cavalcante Silva
Ministro de Estado
Cláudio Scliar
Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Secretaria de
Geologia, Mineração
e Transformação Mineral

Ministério de
Minas e Energia

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

Agamenon Sérgio Lucas Dantas
Diretor - Presidente

Manoel Barretto da Rocha Neto
Diretor de Geologia e Recursos Minerais

José Carlos Garcia Ferreira
Superintendente Regional de São Paulo

CPRM
Serviço Geológico do Brasil

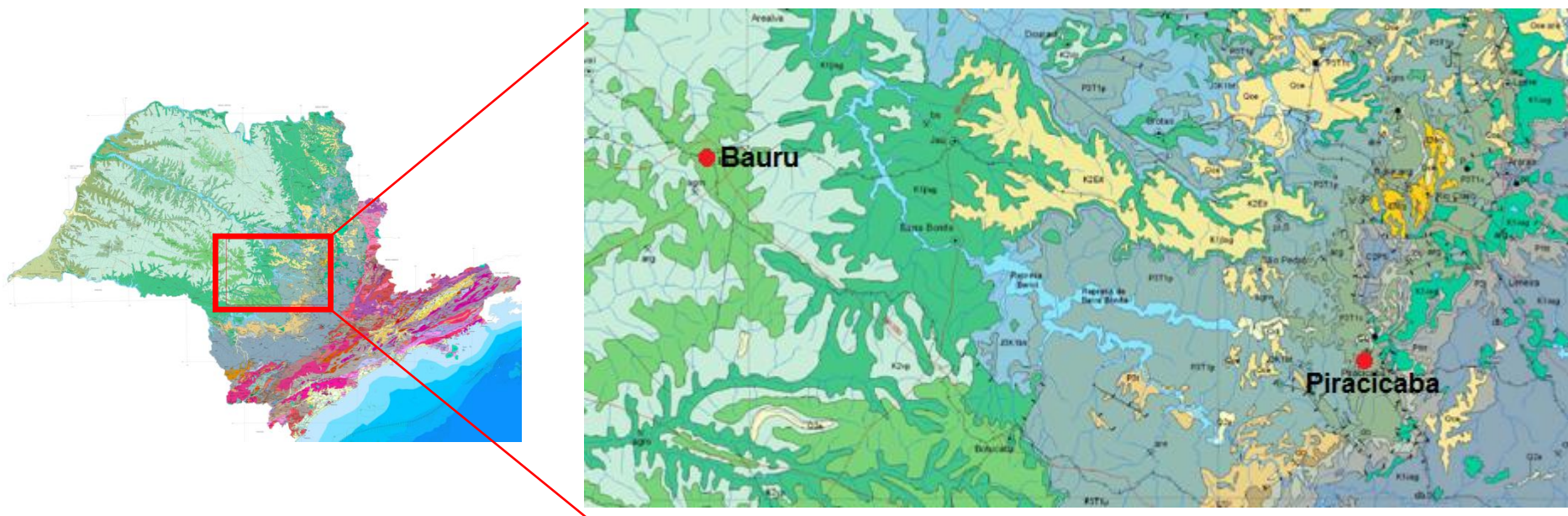


Figura 4.1– Localização das cidades de onde foram retiradas as amostras. (Adaptado de CPRM, 2006.)

SOLO C - Aeroporto Estadual de Piracicaba / Pedro Morganti

A amostra aqui denominada como solo C 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, o talude pelo qual o material foi extraído com teor de umidade natural de 16,6% no momento da coleta, **Figura 4.4**.

O solo C é uma argila arenosa, residual de diabásio, retirada a uma profundidade de 1m, retirando-se apenas a camada superficial.



Figura 4.2 - Foto do local de onde foi extraída a amostra na Erosão em Bauru.



Figura 4.3 – Talude de onde foram retiradas as amostras de solo.



Figura 4.4 - Foto do talude pelo qual foi extraída a amostra em Piracicaba.

4.2 Equipamentos

Os equipamentos apresentados a seguir estão relacionados com as leituras das grandezas elétricas relevantes para a verificação da resistividade em meio particulado através das placas de cobre circulares. Nesses ensaios foram realizadas leituras de corrente, diferença de potencial, frequência, temperatura e medidas RMS de diferença de potencial e corrente elétrica.

4.2.1 Cilindros para Compactação

Os cilindros utilizados foram confeccionados visando atender os estudos de resistividade realizados por Yamasaki(2010). O cilindro (**Figura 4.5** e **Figura 4.6**) foi confeccionado em *tecnyl* com as mesmas medidas do cilindro utilizado para o ensaio de permeabilidade.

No entanto, durante a realização de ensaios Yamasaki(2010) 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.

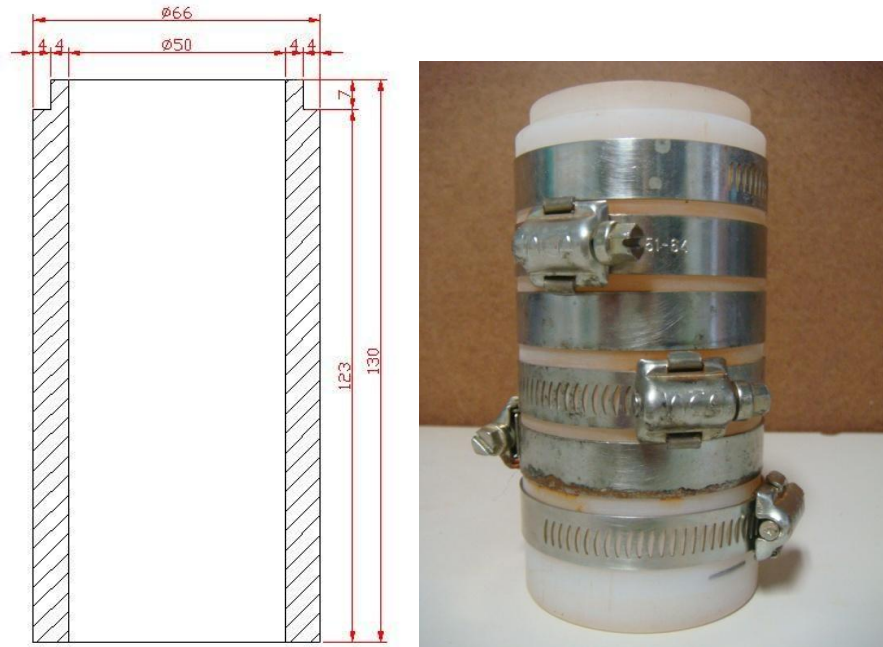


Figura 4.5 – Projeto do cilindro sem escala com as medidas em milímetros. (YAMASAKI, 2012)

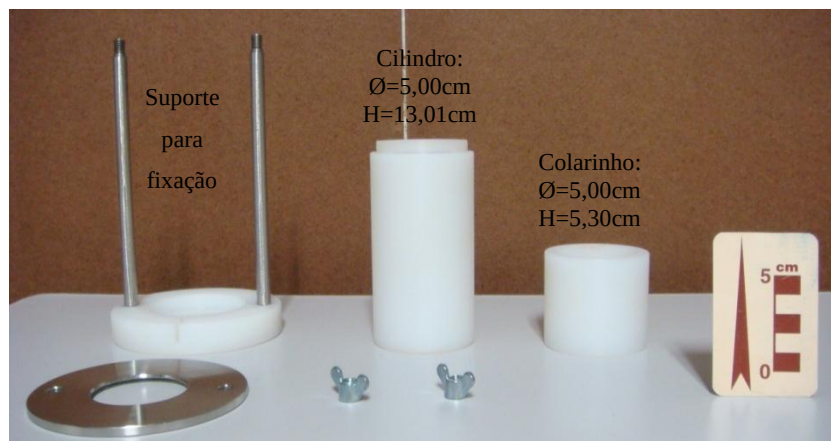


Figura 4.6 – Equipamento para o ensaio de compactação. (YAMASAKI, 2012)

Para a curva de retenção de água foram moldados corpos-de-prova com cerca de 53mm de diâmetro e 13mm de altura. Esses corpos-de-prova foram extraídos de um

cilindro maior, **Figura 4.7**, utilizado para compactação das amostras de solo visto que dessa forma possibilitou extrair um maior número de corpos-de-prova.



Figura 4.7- Mini-cilindro de compactação e modelo do cilindro grande. (YAMASAKI, 2012)

4.2.2 *Ensaio de permeabilidade*

Os ensaios de permeabilidade nas amostras B e C foram realizados por Yamasaki (2012) e assim utilizou-se o mesmo procedimento para a amostra A, tornando possível uma análise mais completa das amostras.

Para a obtenção da resistividade elétrica no solo após a saturação do corpo-de-prova através de fluídos de percolação, foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável. Para não haver influência de nenhum outro material na leitura da resistividade após a saturação do corpo-de-prova, foram projetados acessórios compatíveis ao mini-cilindro, assim pôde-se evitar o surgimento de perturbações na amostra.

Na **Figura 4.8** estão ilustrados os componentes internos a tampa e as suas dimensões podem ser visualizadas na **Figura 4.9**. 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.

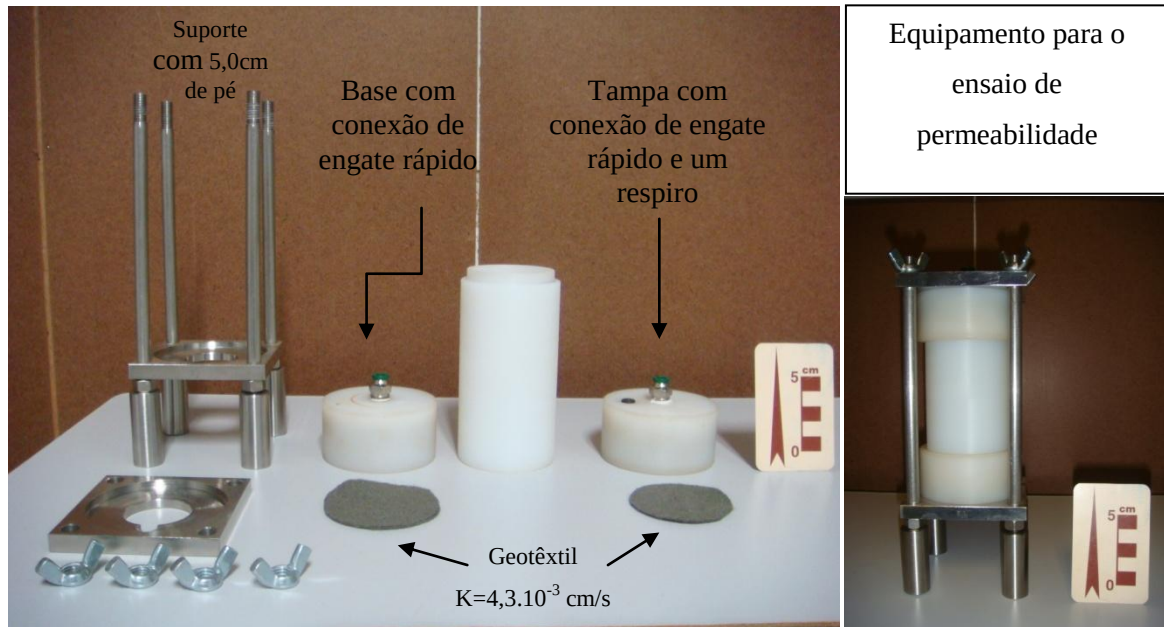


Figura 4.8 — Acessórios para a realização do ensaio de permeabilidade no mini-cilindro (YAMASAKI, 2012).

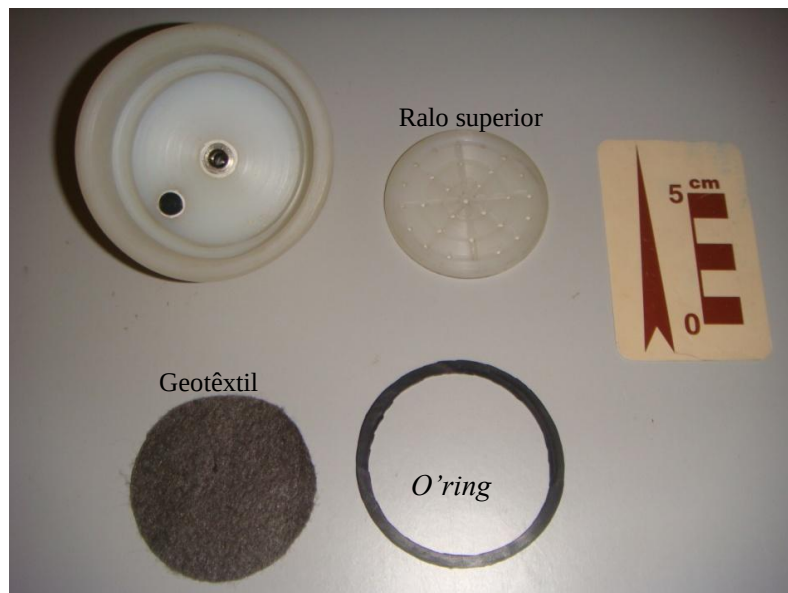


Figura 4.9 – Detalhe da tampa e do ralo superior (YAMASAKI, 2012).

4.2.3 Curva de Retenção de Água no solo

A técnica do papel filtro foi aplicada com o uso do papel Whatman nº 42 e as curvas obtidas foram determinadas através da secagem e umedecimento dos corpos-de-prova. Esta técnica é bastante simples e, portanto, é bastante difundida no meio acadêmico. Nestes ensaios, foi utilizado o procedimento descrito por Marinho e Oliveira (2006).

Os materiais necessários são mostrados na **Figura 4.10**: balança eletrônica com precisão de 0,0001g; tesoura; espátula; pincel; reservatório plástico para transporte do papel filtro; papel filtro whatman nº 42; pinça metálica para remoção e manuseio do papel filtro; fita adesiva; luvas de látex; filme plástico; discos de pvc; anéis de moldagem; etiquetas; recipiente de isopor.

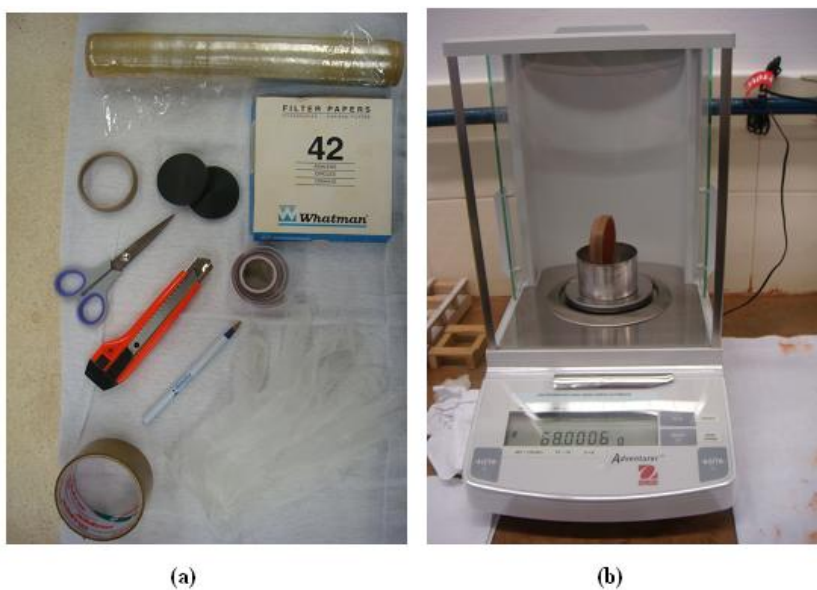


Figura 4.10– (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Balança eletrônica.

Para a curva de retenção de água foram moldados de 15 a 20 corpos-de-prova com cerca de 53mm de diâmetro e 13mm de altura, **Figura 4.11**. Esses corpos-de-prova foram extraídos de um cilindro maior, utilizado para compactação das amostras de solo conforme

pode ser observado na **Figura 4.12**, visto que dessa forma possibilitou extrair um maior número de corpos-de-prova com anéis semelhantes ao ilustrado na mesma figura. Também foi utilizado um soquete de 4,58kg, sendo assim o numero de golpes foi ajustado para 21 golpes por camada de forma a obter a mesma energia do ensaio de compactação normal.

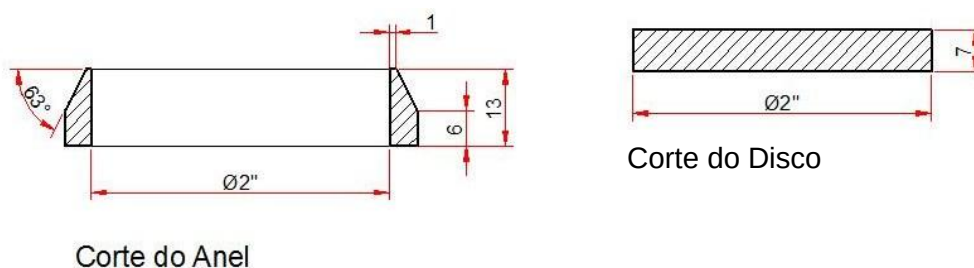


Figura 4.11– Projeto dos anéis e bolachas sem escala com medidas em milímetros.

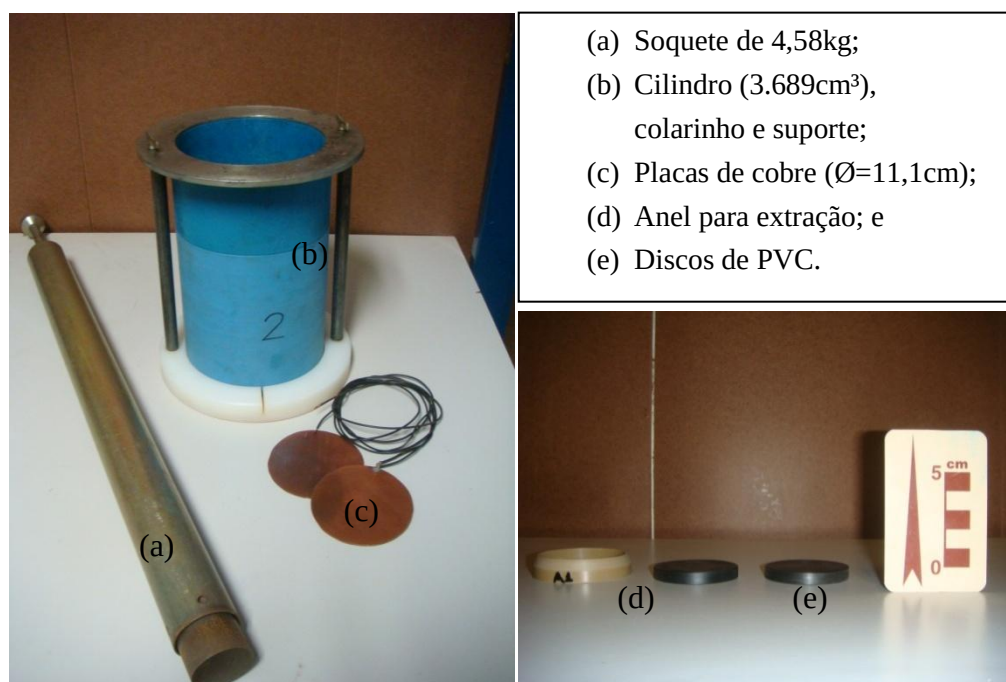


Figura 4.12 – Equipamentos do ensaio para compactação e extração dos corpos-de-prova (YAMASAKI, 2010).

4.2.4 Ensaios de Resistividade Elétrica

O fundamento do ensaio é medir a corrente e a voltagem transmitida de uma placa de cobre a outra, **Figura 4.13**, através do solo estudado e assim obter por correlações o

valor da resistividade. Para tanto, os ensaios de laboratório para obtenção da resistividade foram realizados com duas placas de cobre com 50mm de diâmetro posicionadas nas extremidades opostas do corpo de prova extraído do solo compactado do cilindro padrão, compactado na energia normal. O ensaio de resistividade foi realizado concomitantemente a abertura das amostras do ensaio de papel filtro.

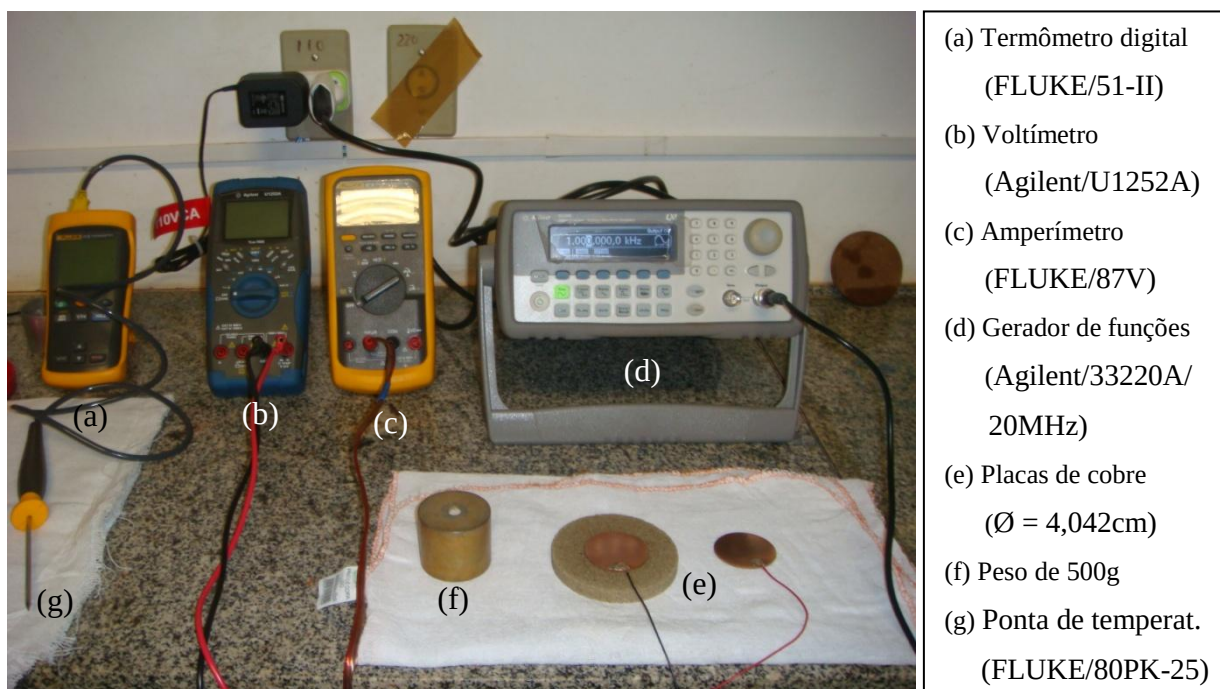


Figura 4.13 – Foto dos equipamentos utilizados para leitura da resistividade (YAMASAKI, 2010).

Para que o ensaio possa ser realizado com maior precisão e eficiência é montada uma estrutura, que pode ser observada na **Figura 4.14** para execução mais ágil, assim os papéis e a amostra foram pesados imediatamente na balança com quatro casas decimais de precisão.



Figura 4.14 – Estrutura montada para o ensaio de aquisição da resistividade em conjunto com a sucção matricial.

4.3 Procedimentos dos Ensaio

Foram realizados ensaios de caracterização das amostras. O ensaio de permeabilidade foi realizado apenas com o ponto correspondente a umidade ótima para a amostra A com o objetivo de complementar os estudos realizados anteriormente com as amostras B e C. E o ensaio de determinação da curva de retenção de água pelas trajetórias de secagem e umedecimento com a aquisição da resistividade, que são o objeto de estudo.

4.3.1 Caracterização das Amostras

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UNESP de Bauru. A metodologia empregada nos ensaios seguiu as especificações constantes nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a metodologia do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), apresentadas a seguir. Os ensaios de caracterização do solo B foram realizados durante a iniciação científica.

A **Tabela 4.1** apresenta as normas utilizadas para cada ensaio, os ensaios que tiveram alguma alteração na metodologia proposta nas normas estão descritos a seguir.

Tabela 4.1 – Métodos utilizados para a caracterização das amostras.

Ensaio	Método
Secagem e Destorroamento	ABNT NBR 6457 - “Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”
Granulometria Conjunta	ABNT NBR 7181 - “Solo – Análise granulométrica”
Peso Específico de Sólidos (γ_s)	ABNT NBR 6508 – “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica”
Limites de Consistência – LL e LP	ABNT NBR 6459 - “Solo – Determinação do limite de liquidez” ABNT NBR 7180 “Solo – Determinação do limite de plasticidade”
Ensaio de Azul de Metileno	O ensaio de Azul de Metileno foi feito segundo o Método do Papel filtro de Pejon (1992).
Ensaio de Compactação	ABNT NBR 7182
Mini-MCV	DNER -ME 258/94
Perda por Imersão	DNER-ME 256/94

Ensaio de Azul de Metileno

O ensaio de Azul de Metileno foi feito segundo o Método do Papel filtro seguindo a metodologia proposta Pejon (1992).

A seguir descrevem-se os procedimentos de preparação das amostras e a execução do ensaio:

Preparação da solução de azul de metileno:

- Determinar a umidade do azul de metileno.
- Tomar a massa correspondente a 0,15g de azul de metileno seco
- Dissolver em 100 ml de água destilada.

Preparação da amostra de solo:

- Determinar a umidade.
- Pesar 2 a 4g de solo na umidade em que se encontra.
- Preparar uma suspensão com o solo e 10 ml de água destilada.

Execução do ensaio:

Para execução do ensaio foram necessários: um agitador magnético, uma bureta graduada, um becker, uma haste de vidro, papel filtro (whatman 42) e cronômetro,

Figura 4.15.

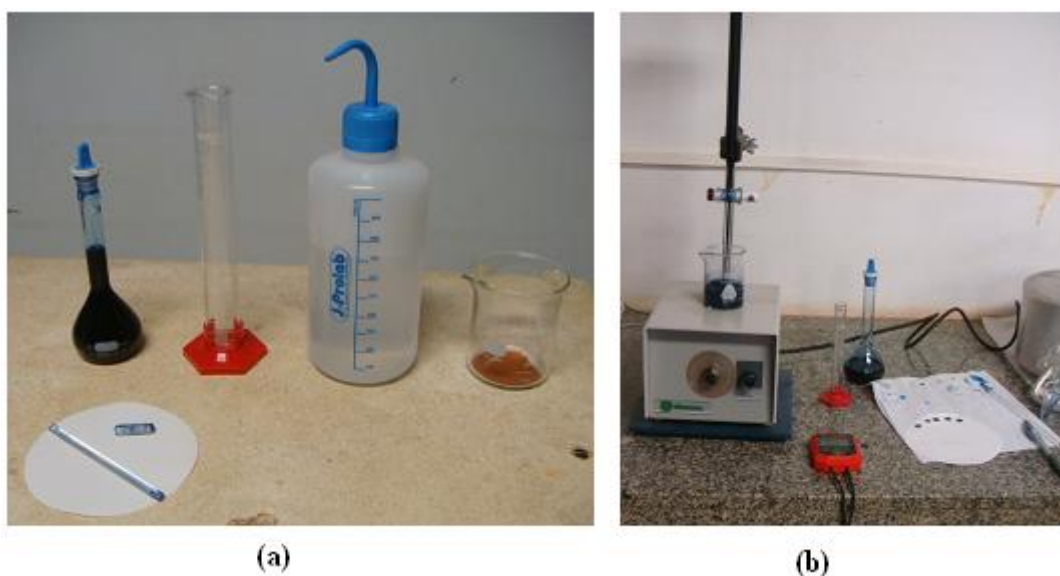


Figura 4.15 – Ensaio de Azul de Metileno. (a) Materiais utilizados e (b) detalhe do ensaio.

Durante a realização do ensaio a suspensão de solo é mantida em constante agitação. Adiciona-se uma quantidade de azul de metileno na suspensão e após 3 minutos, procede-se a retirada de uma gota da suspensão, com a haste de vidro, e colocada sobre o papel filtro. Se ocorrer somente uma mancha azul escura, o teste é considerado negativo, neste caso adiciona-se uma nova quantidade de azul de metileno na suspensão até a obtenção de um resultado positivo. Caso aparece uma aureola azul clara em torno da

mancha azul escura, o teste é positivo, isto é, quando a solução já contém excesso de corante.

Quando o teste for positivo aguarda-se um intervalo de mais 3 minutos e repete-se o teste sobre o papel filtro, se o resultado for positivo o ensaio está encerrado. Caso contrário adiciona-se metade da quantidade anterior de azul de metileno e repete-se os teste, até a obtenção do resultado positivo.

Ensaio de Compactação:

Realizou-se o ensaio de compactação utilizando energia de compactação Proctor normal com reuso do solo e seguindo as especificações constantes na NBR 7182 “solo - ensaio de compactação”.

A amostra de solo foi passada na peneira nº4 (4,8 mm) e adicionou-se certa quantidade de água. Após a homogeneização, o solo foi compactado com 26 golpes a energia normal em três camadas iguais, sendo realizada ao término de cada uma a escarificação do solo para melhor aderência entre elas. Removido o colarinho e a base, regularizou-se a superfície do material à altura do molde e pesou-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado, como mostra a **Figura 4.16**.

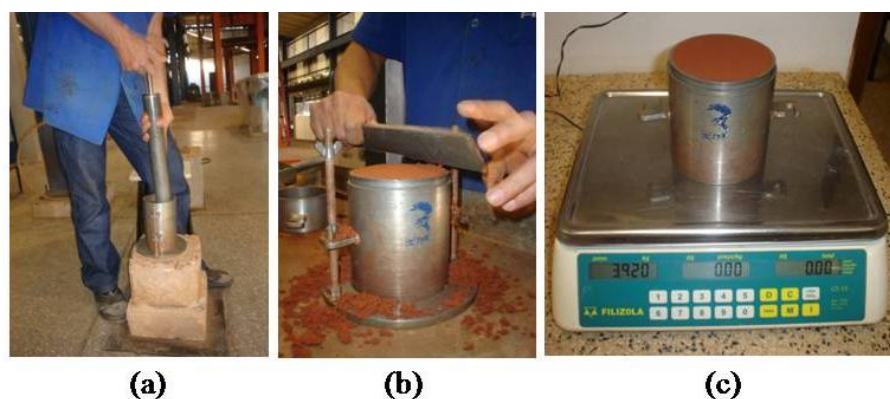


Figura 4.16 – Curva de compactação com energia Proctor normal.

Após a pesagem do conjunto, retirou-se a amostra do molde com auxílio do extrator, e coletou-se uma pequena quantidade para a determinação da umidade do meio do corpo de prova, **Figura 4.17.a**, para pesagem em cápsula como mostra a **Figura 4.17.b**.

O material compactado foi destorroadado e passado pela peneira nº4 (4,8mm) novamente, homogeneizando-o em seguida ao restante da amostra inicial para o reuso do material como mostra a **Figura 4.17.c**. Adicionou-se água à amostra homogeneizando-a para obtenção de outra umidade e repetiu-se o por mais quatro vezes.

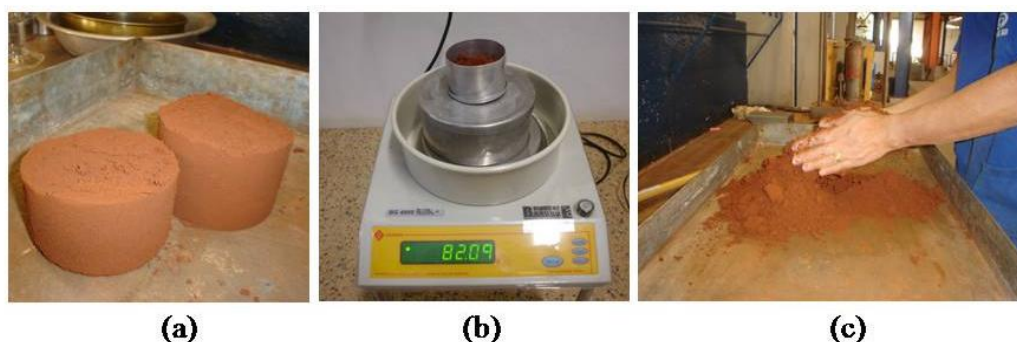


Figura 4.17 – Processo para obtenção da umidade. (a) amostra partida ao meio, (b) pesagem da porção retirada e (c) homogeneização da amostra para reuso.

4.3.2 Ensaio de permeabilidade

Escolheu-se o ponto de teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima para realizar o ensaio de permeabilidade. Logo, para a preparação da amostra deste ensaio segue a mesma metodologia empregada no ensaio de compactação, energia normal.

O objetivo desse ensaio foi a aquisição da resistividade elétrica do solo antes e após a saturação.

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 4.18**.



Figura 4.18 – Ligação do cilindro ao sistema com o sobrepeso.

Os ensaios prosseguiram o mesmo padrão definido 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.

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 4.19**. Mediu-se a condutividade e a temperatura da água no reservatório e no tanque.



Figura 4.19 - Detalhe do tanque inferior com orifício de escape.

Para possibilitar o confinamento do corpo-de-prova retirou-se as abraçadeiras mais próximas as extremidades e foram acoplados os acessórios, com o esquema de montagem observado na **Figura 4.20**. 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*.

O permeâmetro foi ligado 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.

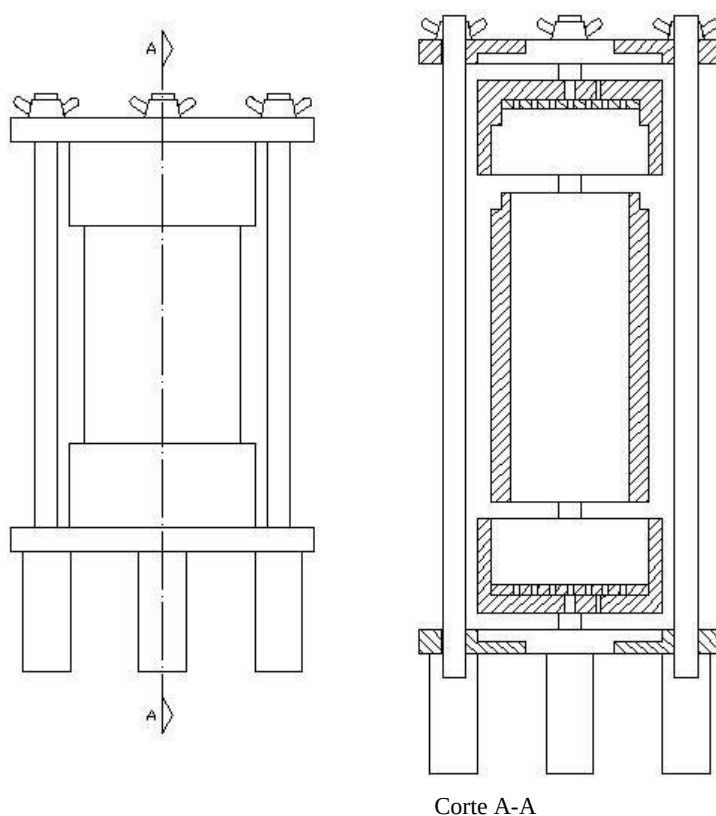


Figura 4.20– Sequência para montagem do permeâmetro, sem escala.

O período de saturação para o solo arenoso foi de aproximadamente 36 horas, quando a mangueira do conector inferior foi desconectada passando-a para a tampa, fechando-se o respiro e deixando-se percolar durante uma hora.

A seguir, para realizar a leitura da altura de água, 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 para o solo arenoso aproximadamente 20 minutos.

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 4.1 e foi corrigido para 20°C pela equação 4.2.

$$K_T = 2,3 \cdot \left[\frac{aL}{A \cdot t} \right] \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad (4.1)$$

No qual: a – área do tubo de carga (cm²); L – altura do corpo-de-prova (cm); A – área do corpo-de-prova (cm²); t – tempo (s); h₁ – coluna inicial (cm); e h₂ – coluna final (cm).

$$K_{20} = K_T \cdot C_K \quad (4.2)$$

Em que: C_K – fator de correlação

4.3.3 Curva de Retenção de Água no solo – Método do Papel filtro

O método utilizado para obtenção da curva de retenção de água no solo foi a técnica do papel filtro, que consiste em colocar um papel de características de retenção conhecidas num ambiente vedado junto com uma amostra de solo. A determinação da sucção é obtida através de uma curva de calibração do papel, uma vez que dado o contato entre o papel e o solo ocorre migração de água até que haja o equilíbrio de potencial.

Para a curva de retenção de água foram moldados de 15 a 20 corpos-de-prova com cerca de 53 mm de diâmetro e 13 mm de altura. Esses corpos-de-prova foram extraídos de um cilindro maior, utilizado para compactação das amostras de solo visto que dessa forma

possibilitou extrair um maior número de corpos-de-prova com anéis semelhantes ao ilustrado na mesma figura. Também foi utilizado um Soquete de 4,58kg, sendo assim o numero de golpes foi ajustado para 21 golpes por camada de forma a obter a mesma energia do ensaio de compactação.

Preparação para obtenção pela trajetória de secagem:

Após a moldagem, **Figura 4.21**, as amostras foram assentadas sobre placas porosas parcialmente submersas em água destilada deaerada em uma bandeja, permanecendo durante o período de no mínimo 24h, **Figura 4.22**.

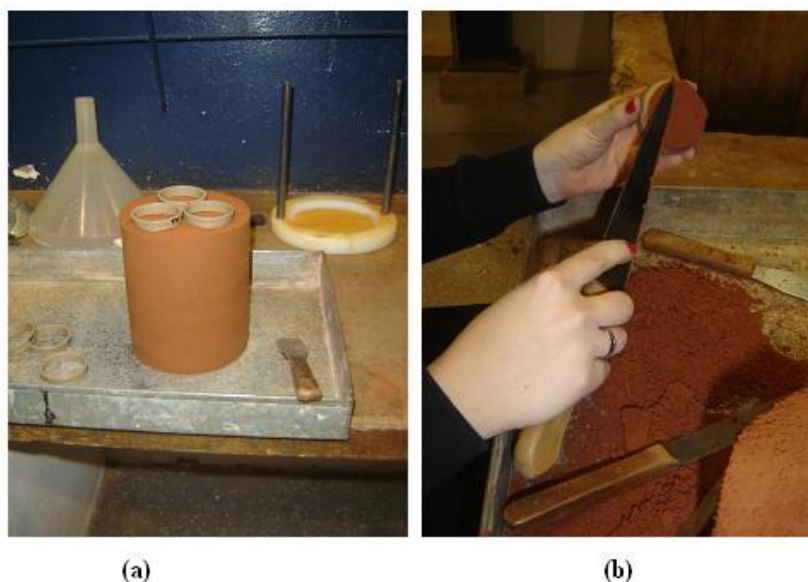


Figura 4.21 – (a) Corpo de prova de onde as amostras foram retiradas; (b) Processo de retirada das amostras.

Na sequência, cada amostra foi retirada da bandeja para secagem, sendo pesada periodicamente até atingir a massa desejada, para um melhor controle da umidade de cada anel. Ao atingir a massa especificada, cada corpo-de-prova foi colocado em contato no topo e na base com um disco do papel filtro Whatman nº 42, recortados ligeiramente menores do que os anéis das amostras.



(a)

(b)

Figura 4.22 – (a) e (b) Processo de saturação das amostras.

Em seguida cada amostra foi envolvida em filme plástico e pressionada por discos de PVC de forma a garantir o total contato entre o solo e o papel. Este conjunto foi embalado com fita adesiva, etiquetado e armazenado em recipiente isolado por cerca de 15 dias, de maneira a assegurar o equilíbrio de fluxo de umidade entre o solo e o papel filtro. Esses procedimentos podem ser observados na **Figura 4.23**.



(a)



(b)

Figura 4.23 – (a) Amostras no processo de secagem; (b) Amostras após colocação do papel filtro e embalagem.

Preparação para obtenção da trajetória de Umedecimento:

Após a moldagem as amostras foram colocadas em um local para secagem ao ar, **Figura 4.24.a.** Depois da secagem, cada amostra foi umedecida por gotejamento até atingir a massa desejada, para um melhor controle da umidade de cada anel, **Figura 4.24.b.**

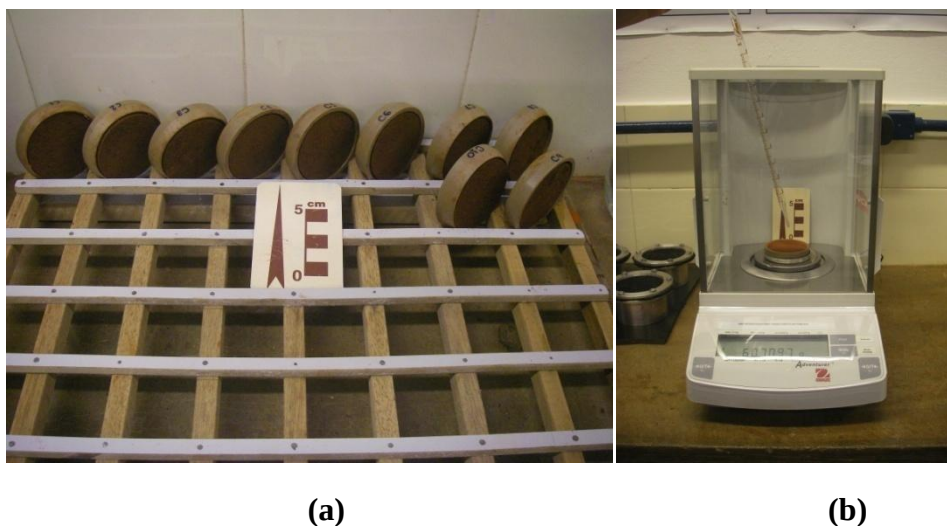


Figura 4.24 – (a) Amostras no processo de secagem; (b) Amostras durante o processo de gotejamento controlando o peso.

Ao alcançar a massa especificada, cada corpo-de-prova foi colocado em contato no topo e na base com um disco do papel filtro Whatman nº 42, recortados ligeiramente menores do que os anéis das amostras.

Em seguida cada amostra foi envolvida em filme plástico e pressionada por discos de PVC de forma a garantir o total contato entre o solo e o papel. Este conjunto foi embalado com fita adesiva, etiquetado e armazenado em recipiente isolado por cerca de 15 dias, assegurando o equilíbrio de umidade entre o solo e papel filtro.

Abertura dos corpos de prova:

Após o período de espera cada conjunto foi desmontado e o filme plástico retirado. Os papéis e as amostras foram pesadas imediatamente na balança eletrônica e colocados na estufa para secagem. Depois da secagem foram pesados novamente.

Desse modo procedeu-se o calculo de umidade dos papeis filtro (w_{papel}) e do solo (w). Com as umidades dos papeis calculou-se a sucção matricial por meio das equações de correlação de Chandler et al.(1992):

$$S = 10^{6,05 - 2,48 \log w_{papel}} \quad w_{papel} \geq 47\% \quad [\text{kPa}] \quad (4.3)$$

$$S = 10^{4,84 - 0,0622 w_{papel}} \quad w_{papel} < 47\% \quad [\text{kPa}] \quad (4.4)$$

Dessa forma, com os valores de sucção-umidade compôs-se a curva de retenção no solo.

4.3.4 Ensaios de Resistividade Elétrica

O ensaio de resistividade foi realizado concomitantemente a abertura das amostras do ensaio de papel filtro conforme mostra o esquema da **Figura 4.25**.



Figura 4.25 – Esquema para realização do ensaio de papel filtro em conjunto com o ensaio para leitura de resistividade.

Antes de retirar o filme plástico das amostras, montou-se a estrutura observada na **Figura 4.26**, para execução mais ágil, assim os papéis e a amostra foram pesados imediatamente na balança com quatro casas decimais de precisão.

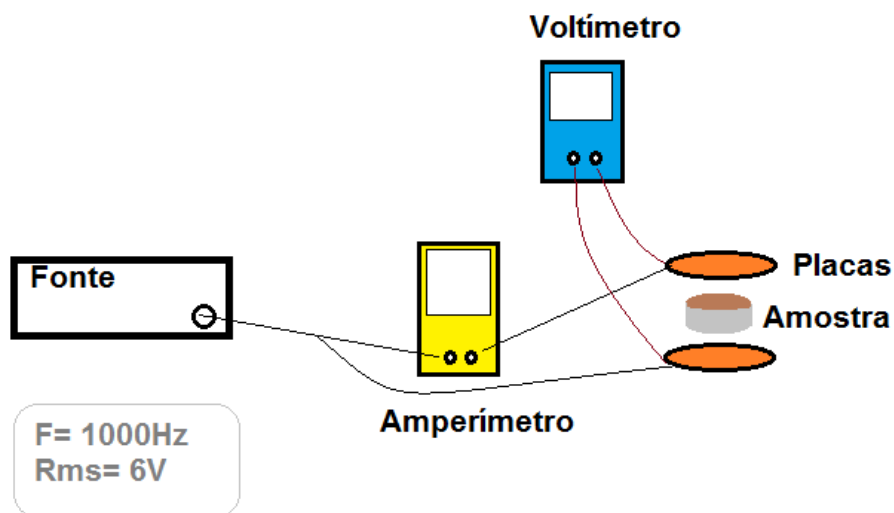


Figura 4.26 – Montagem do circuito para realização das leituras.

- *Montagem do equipamento:*

É realizada a montagem do equipamento, **Figura 4.26**, a fonte é ligada a rede local. Ela é conectada ao amperímetro e as placas de cobre. Liga-se o voltímetro em paralelo. A fonte é regulada para que forneça uma diferença de potencial de 6V.

Ensaio:

1. Após o tempo de equilíbrio, cada conjunto foi desmontado com estilete e tesoura, os papéis filtro foram retirados com auxílio de pinça e partículas de solo aderidas aos papéis foram rapidamente removidas com auxílio de um pincel, e logo em seguida foram pesados em balança eletrônica com precisão de 0,0001g, colocados em uma cápsula média e levadas à estufa para secagem.
2. Pesa-se o anel preenchido com solo.

3. Após a pesagem, rapidamente são colocadas as placas de cobre, uma na parte de baixo e outra na parte de cima, **Figura 4.27**.

4. No circuito montado, fornecendo-se frequência de 1000 hertz foram anotadas as medidas de corrente e voltagem de cada amostra, verificando-se sempre os padrões previamente mencionados.

5. Na etapa final retira da camada central uma porção da amostra para a aquisição da umidade. O procedimento foi repetido para os demais pontos de umidade definidos pelos ensaios de caracterização.



Figura 4.27 - Amostra durante o ensaio de resistividade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das amostras, as curvas de retenção de água nos solos e os resultados e análises dos ensaios de resistividade elétrica realizados nas amostras dos ensaios com Papel Filtro.

5.1 Caracterização Geotécnica

Os resultados obtidos na caracterização das amostras de solo estudadas nesta pesquisa estão resumidos na **Tabela 5.1**, bem como as curvas granulométricas dos ensaios com e sem defloculante a base de hexametáfosfato, nas **Figuras 5.1, 5.2 e 5.3**.

Os ensaios realizados sem a solução defloculante têm como objetivo verificar o comportamento real das partículas do solo, observando concreções e partículas que permanecem agregadas.

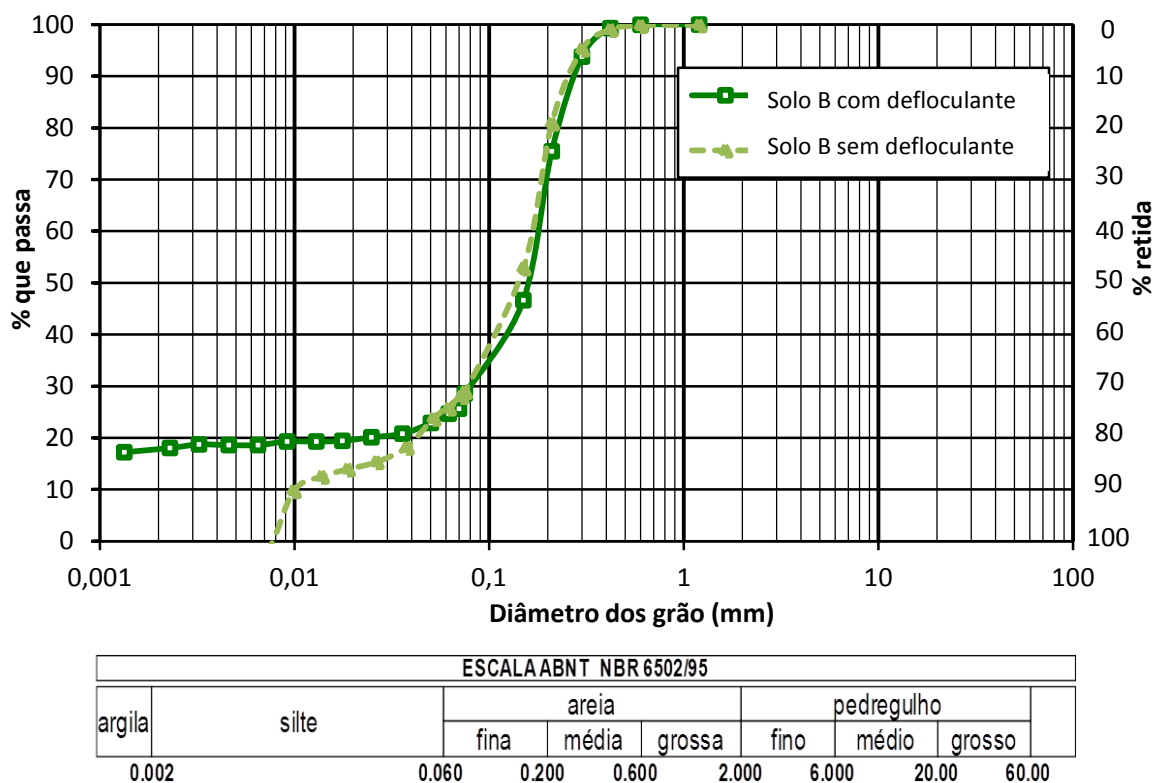
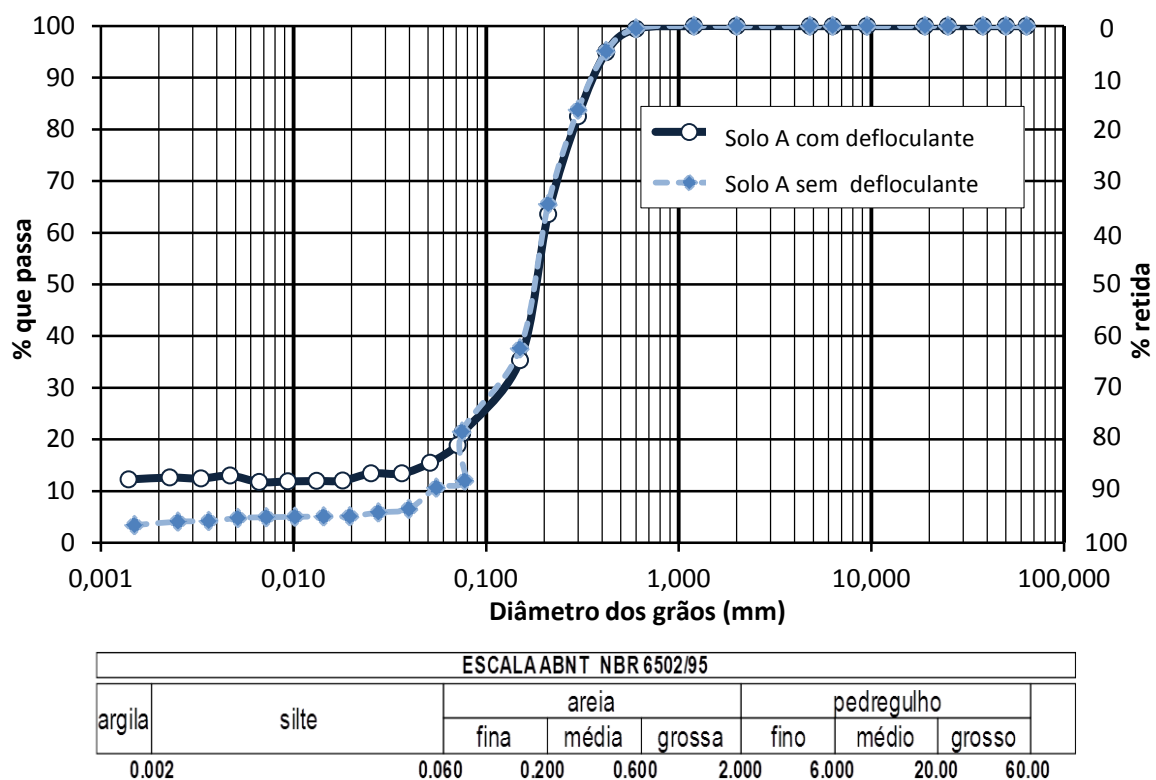
Nota-se uma pequena variação nas porcentagens de argila e silte no ensaio de granulometria do solo A. Realizando o ensaio sem defloculante é possível notar uma pequena variação nas porcentagens de argila e silte, pois os finos permanecem agregados às partículas de dimensão maior.

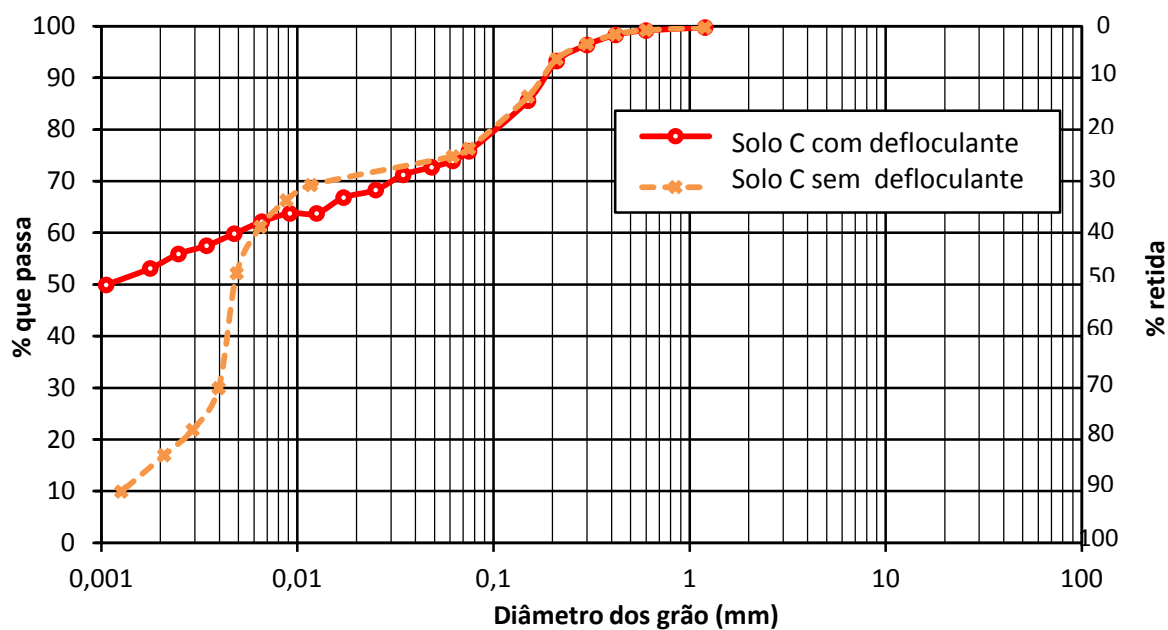
Na amostra B sem o uso do defloculante, as partículas de argila permanecem agregadas, assim, essa ligação entre as partículas resultou na quantidade nula da fração argila.

A principal variação da curva granulométrica do solo C 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.

Tabela 5.1 – Propriedades dos solos.

Localização	SOLO A	SOLO B	SOLO C
	Areia fina média argilo-siltosa cinza claro com veios amarelos	Areia fina pouco argilosa marrom avermelhado	Argila arenosa roxa escura
Classificação MCT	Areia argilosa não laterítica (NA')	Areia argilosa laterítica (LA')	Argila Laterítica(LG')
Areia Grossa (%)	0,5	0	0,9
Areia média (%)	35,9	19,2	6,6
Areia fina (%)	42,5	56,6	18,5
Silte (%)	8,6	6,2	20
Argila (%)	12,5	18	54
ρ_s (g/cm ³)	2,613	2, 636	2,863
w_{ot} (%)	9,8	11,6	23,9
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,975	1, 925	1,605
LL (%)	-	24	42
LP (%)	-	-	29
IP (%)	NP	NP	14
Classificação Unificada	SC	SC	CL





ESCALA ABNT NBR 6502/95								
argila	silte	areia			pedregulho			
		finha	média	grossa	fino	médio	grosso	
0.002	0.060	0.200	0.600	2.000	6.000	20.00	60.00	

Figura 5.3 – Curva granulométrica com e sem defloculante do solo C (Aterro Piracicaba).

5.2 Curvas de Compactação

A partir das curvas de compactação para as amostras A, B e C, **Figura 5.4**, obteve-se a umidade ótima de ($w_{ót}$) e o peso específico seco máximo do solo ($\rho_{dmáx}$). Os ensaios para o solo A foram realizados recentemente. Os ensaios para o solo B foram realizados por Campos (2012) em conjunto com Yamasaki (2012) e os ensaios para o Solo C foram realizados por Yamasaki (2012).

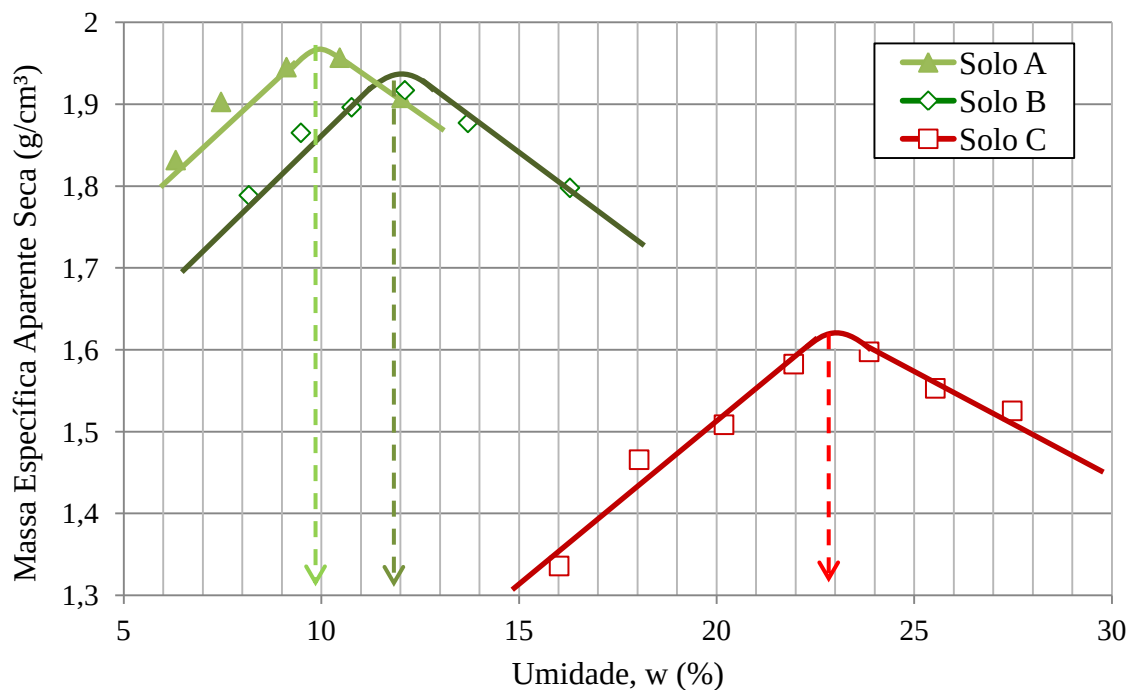


Figura 5.4 – Curva de compactação com energia Proctor normal.

Analisando-se as curvas de compactação apresentadas na Figura 5.4, verifica-se que as características particulares são distintas, como por exemplo, a amostra A possui um pico mais acentuado com massa específica aparente seca maior e teor de umidade ótimo menor peculiar de solo arenoso, assim como a amostra B. Já a curva da amostra C é composta por características que conferem com solos argilosos, ou seja, apresenta curvatura mais suave com os pontos ligeiramente deslocada para a direita, **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Valores obtidos no ensaio de compactação com energia Proctor Normal.

	Solo A	Solo B	Solo C
$w_{ót}$ (%)	9,8	11,6	23,9
$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,975	1, 925	1,605

5.3 Ensaio de Azul de Metileno

Através do ensaio de azul de metileno foi possível calcular 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}). Os resultados dos ensaios foram apresentados na **Tabela 5.3**.

Tabela 5.3 - Cálculo e análises do ensaio de azul de metileno pelo método de Pejon (1992).

Solo	% arg.	Cálculos			
		CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)	V_b (g/100g de agregado)	A_{cb} (g/100g de argila)
Solo A	12,5	3,70	28,86	1,18	9,46
Solo B	18	3,84	30,03	1,21	6,71
Solo C	55	4,88	38,17	1,56	2,85

Analisando-se os valores obtidos para CTC e comparando-os aos da **Tabela 5.4** proposta por Beaulieu (1979), estima-se que o argilo-mineral presente em maior quantidade nas amostras A e B pode ser a caolinita, visto que o valor de CTC abrange a faixa entre 3 e 5 e para o solo C o argilo-mineral pode ser caolinita ou Halosita 2 H₂O. E com probabilidade de acerto de 85%, o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos, conforme **Figura 5.5**.

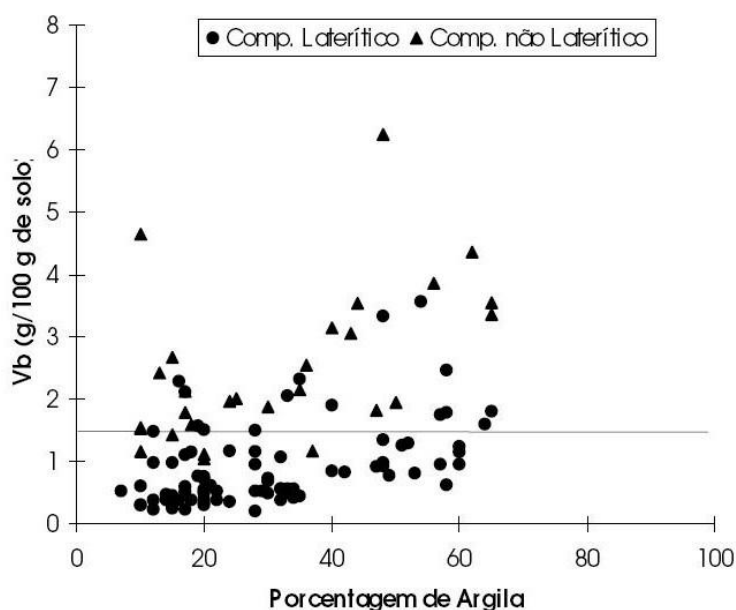
Quanto ao valor de azul, ambas as amostras podem ser consideradas com comportamento laterítico. Embora o solo Piracicaba apresente valor um pouco acima observado pela **Figura 5.5**. Pejon (1992), ressalta que há um grau de incerteza naqueles solos cujo V_b está entre 1,5 e 2,5, cuja combinação dos ensaios anteriores confirma-se esse comportamento.

Tabela 5.4 – Tabela de intervalos de Capacidade de troca de cátions.

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

Beaulieu (1979)

A atividade para o Solo B foi classificada como normal de acordo com o diagrama de atividade das argilas elaborado por Lautrin (1989) *apud* Pejon (1992), **Figura 5.6**. Enquanto o Solo C, embora possua metade da sua composição concentrada na fração fina, apresentou atividade inferior ao Solo B, sendo classificado como inativa. Isto se deve, possivelmente, a rocha que deu origem ao solo e ao grau de intemperismo. Já o solo A pode ser classificado como ativa.

**Figura 5.5** – 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)

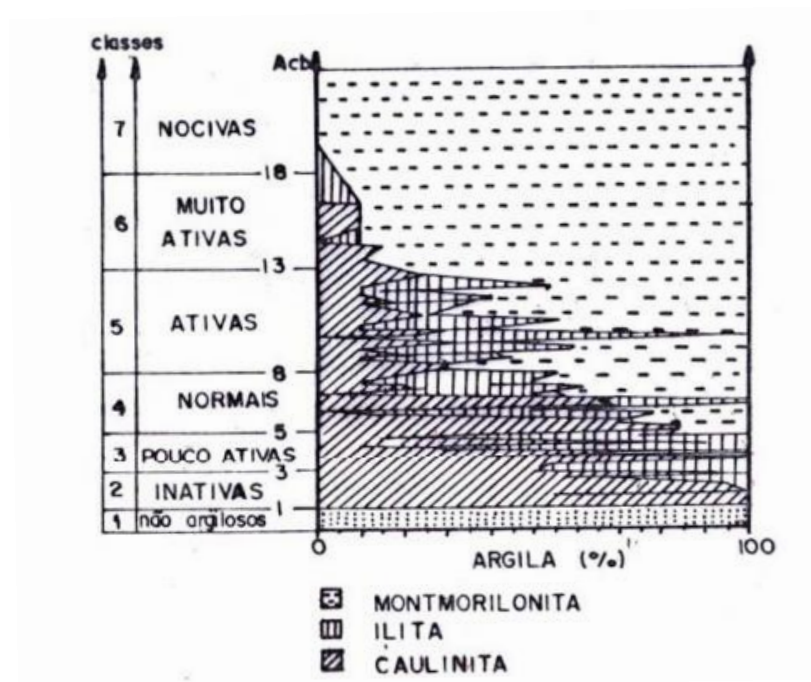


Figura 5.6 – Diagramas da atividade das argilas pelo método do azul de metileno (LAUTRIN, 1989 *apud* PEJON, 1992).

5.4 Ensaio de Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade para a amostra A foram realizados, visando uma melhor análise dos resultados obtidos, e possibilitando a comparação com os ensaios de permeabilidade para as amostras B e C, realizados por Yamasaki (2012).

O objetivo desse ensaio foi a aquisição da resistividade elétrica do solo antes e após a saturação e verificar as diferenças nos resultados obtidos utilizando água destilada e água potável.

Os resultados obtidos para a amostra A estão apresentados na **Tabela 5.5**. Os valores para o coeficiente de permeabilidade obtido pelo ensaio a carga variável realizados por Yamasaki (2012) estão apresentados conforme **Tabela 5.6**.

Tabela 5.5 – Valor do coeficiente de permeabilidade para a amostra A, a 20°C.

Amostra\Fluido	Destilada	De abastecimento
K (Amostra A)	$1,9 \cdot 10^{-05}$ m/s	$1,1 \cdot 10^{-05}$ m/s

Tabela 5.6 – Valores do coeficiente de permeabilidade para as amostras B e C, a 20°C (YAMASAKI,2012).

Amostra\Fluído	Destilada	De abastecimento
K (Amostra B)	$1,2 \cdot 10^{-8}$ m/s	$3,0 \cdot 10^{-8}$ m/s
K (Amostra C)	$3,7 \cdot 10^{-10}$ m/s	$4,2 \cdot 10^{-10}$ m/s

Pinto (2006) considera que areias argilosas e argilas possuem, respectivamente, coeficiente de permeabilidade da ordem de grandeza de 10^{-7} e de 10^{-9} m/s.

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 da amostra. Os resultados obtidos para a Amotra A estão apresentados na **Tabela 5.7**. Na **Tabela 5.8**, estão apresentados os valores obtidos por Yamasaki (2012) para a amostra B e da amostra C na **Tabela 5.9**. 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 5.7 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para a amostra A.

Fluído		w (%)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade ($\mu S/cm$)	γ_d (kN/m^3)	e	n (%)	Sr (%)
Destilada	Antes	9,8	114,1	87,6	18,77	0,392	28,18	65,42
	Depois	12,1	33,6	291,7	18,75	0,393	28,20	80,66
De abastecimento	Antes	10	504,9	19,8	18,55	0,409	29,03	63,78
	Depois	12,7	254,9	39,2	18,52	0,413	29,25	80,45

Tabela 5.8 – Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para Amostra B (Adaptado de YAMASAKI, 2012).

Fluído		W	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade ($\mu S/cm$)	γ_d (kN/m^3)	e	n (%)	Sr (%)
		(%)						
Destilada	Antes	12,6	956,0	10,4	18,62	0,41	29,53	79,43
	Depois	13,6	680,0	14,7	18,59	0,41	29,63	85,17
De abastecimento	Antes	12,2	578,3	17,5	18,41	0,43	30,30	74,27
	Depois	14,3	576,7	17,9	18,39	0,43	30,37	86,37

Tabela 5.9 - Valores da resistividade e condutividade elétrica, massa específica aparente seca e os índices físicos para a amostra C (Adaptado de YAMASAKI, 2012).

Fluído		w (%)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Condutividade ($\mu S/cm$)	γ_d (kN/m^3)	e	n (%)	Sr (%)
Destilada	Antes	24,8	84,0	119,0	15,72	0,82	45,1	86,9
	Depois	25,6	53,0	190,5	15,78	0,82	44,9	90,4
De abastecimento	Antes	24,6	103,76	96,4	15,49	0,85	45,9	83,3
	Depois	26,3	39,55	252,9	15,62	0,84	45,5	90,7

Observa-se que após a percolação do fluído, 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, sendo um indicativo da maior interferência do fluido.

Pelo ensaio de permeabilidade, verificou-se que quanto maior a quantidade de água nos vazios há um aumento da condutividade elétrica do meio, independente do fluido utilizado.

5.5 Curvas de Retenção da Água no Solo

Os resultados dos ensaios para obtenção das curvas de retenção nas duas trajetórias para os três solos estão apresentados nesse capítulo. Durante a execução do ensaio é importante ressaltar algumas observações constadas durante os mesmos:

- Fez-se necessário a realização da pesagem e do ensaio com as placas após a abertura dos corpos de prova, com rapidez para que não houvesse perdas de umidade do papel filtro e do solo. Assim para facilitar, o ensaio foi realizado ao lado da balança.
- Utilização de discos de PVC pressionando o papel filtro sobre o solo de forma que o contato entre papel e solo fosse garantido.

- Para a realização da trajetória de umedecimento, além dos cuidados citados, foi necessário um gotejamento lento e cuidadoso para que não causasse deformidade na superfície do corpo de prova, atrapalhando o contato do papel filtro com o solo.

Para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios foi utilizado o ajuste segundo a equação de Van Genuchten (1980), expressa na equação (5.1). Para todas as amostras foram necessários dois ajustes para cada conjunto de pontos obtidos durante o ensaio. Isto ocorre pelo fato dos solos estudados apresentarem um comportamento bimodal, ou seja, dois pontos de entrada de ar. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de macro e microporos no solo, **Figura 3.15**.

$$w = w_r + (w_s - w_r) \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^m} \right\} \quad (5.1)$$

em que w_s e w_r são as umidades de saturação e residual, α , m e n são parâmetros de curvatura e s é a sucção.

5.5.1 Amostras Compactadas

SOLO A - Processo erosivo no córrego Água Comprida

Na **Figura 5.7** constam os pontos obtidos para o solo A através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada.

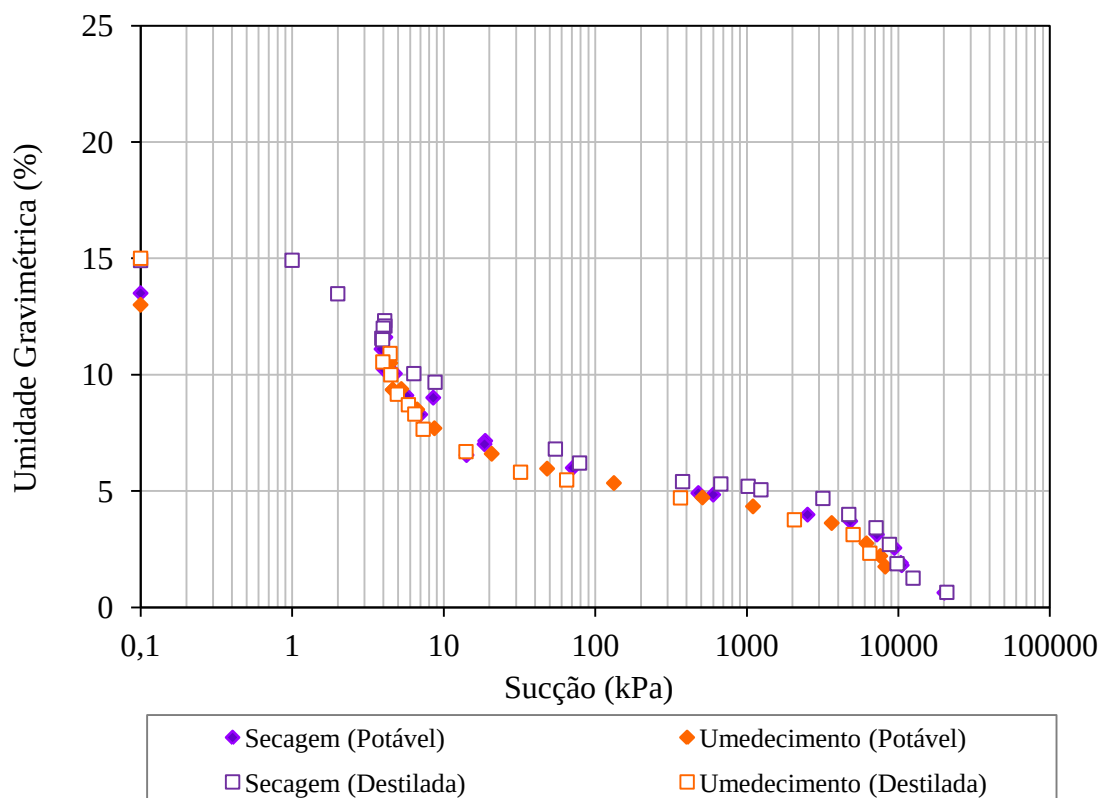


Figura 5.7 — Gráfico dos pontos obtidos para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

Ajuste pela equação de Van Genuchten (1980)

Na **Figura 5.8** são mostradas as curvas de ajuste e os pontos obtidos experimentalmente para o solo do processo erosivo ao longo do córrego água comprida através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada. Os parâmetros de ajuste são apresentados na **Tabela 5.10**.

O ajuste das curvas se mostrou eficiente, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,946.

As curvas obtidas corroboram à curva típica de solos arenosos, apresentada por Fredlund e Xing (1994), **Figura 3.16**. Este tipo de curva apresenta uma zona de dessaturação quase vertical, sendo uma grande variação de umidade em um pequeno intervalo de variação de sucção. A partir do gráfico é possível observar duas pressões de

entradas de ar, a primeira é de, aproximadamente, 2kPa, e a segunda pressão de entrada de ar é de, aproximadamente, 1 MPa. Essas duas pressões de entrada podem ser relacionadas às pressões de entrada de ar nos macro e microporos, respectivamente.

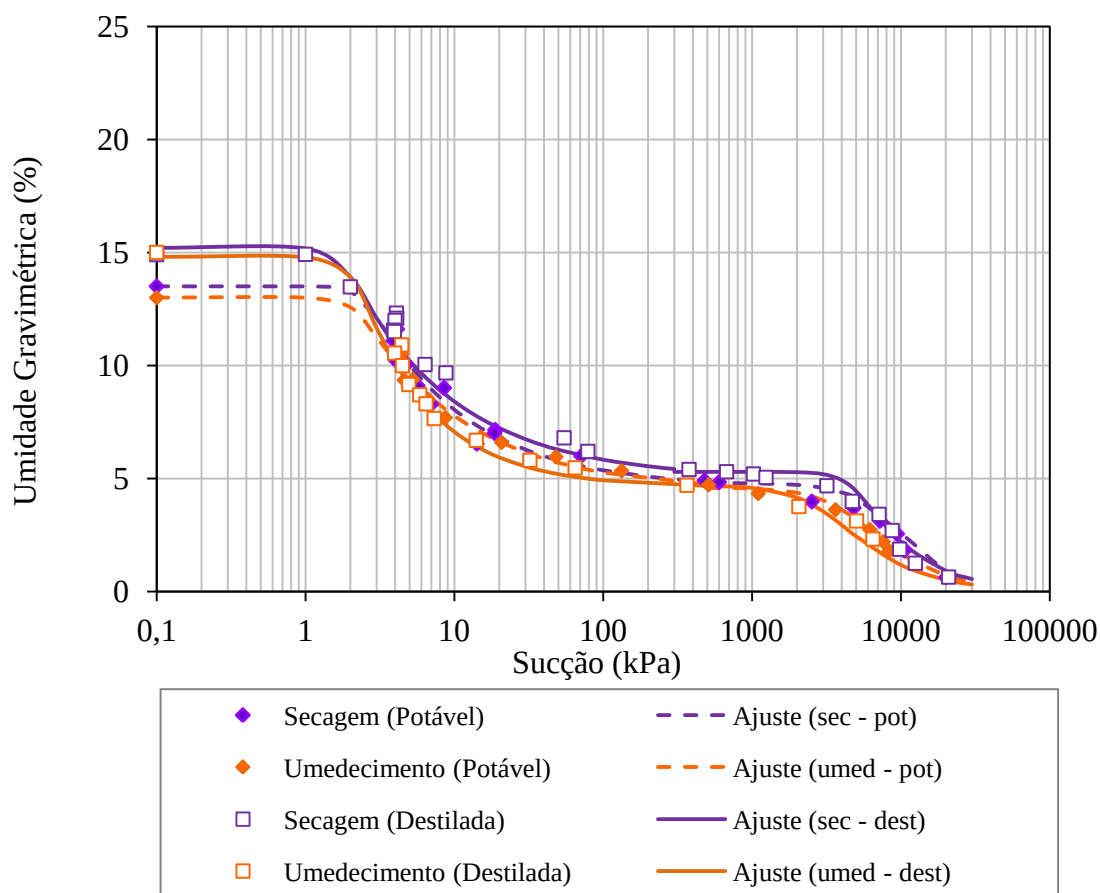


Figura 5.8 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.

Tabela 5.10 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo A.

Trajetória		Trecho	α (kPa ⁻¹)	m	n	w_r (%)	w_s (%)	R^2
Água Potável	secagem	1	0,4274	0,0881	7,4198	4,6	13,5	0,964
		2	0,0001	0,8943	2,4338	0,0	4,8	0,982
	umedecimento	1	0,4862	0,085	6,9541	4,4	13	0,997
		2	0,0002	0,5302	2,5068	0	4,6	0,992
Água Destilada	secagem	1	0,602	0,089	6,8641	5,0	15,2	0,946
		2	0,0002	0,2524	4,9647	0,0	5,3	0,973
	umedecimento	1	0,5012	0,1321	6,6641	4,6	14,8	0,990
		2	0,0003	0,4924	2,4947	0	4,7	0,988

SOLO B - Aterro de Resíduos Sólidos de Bauru

A **Figura 5.9** ilustra os pontos obtidos para o solo do Aterro de Bauru através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada.

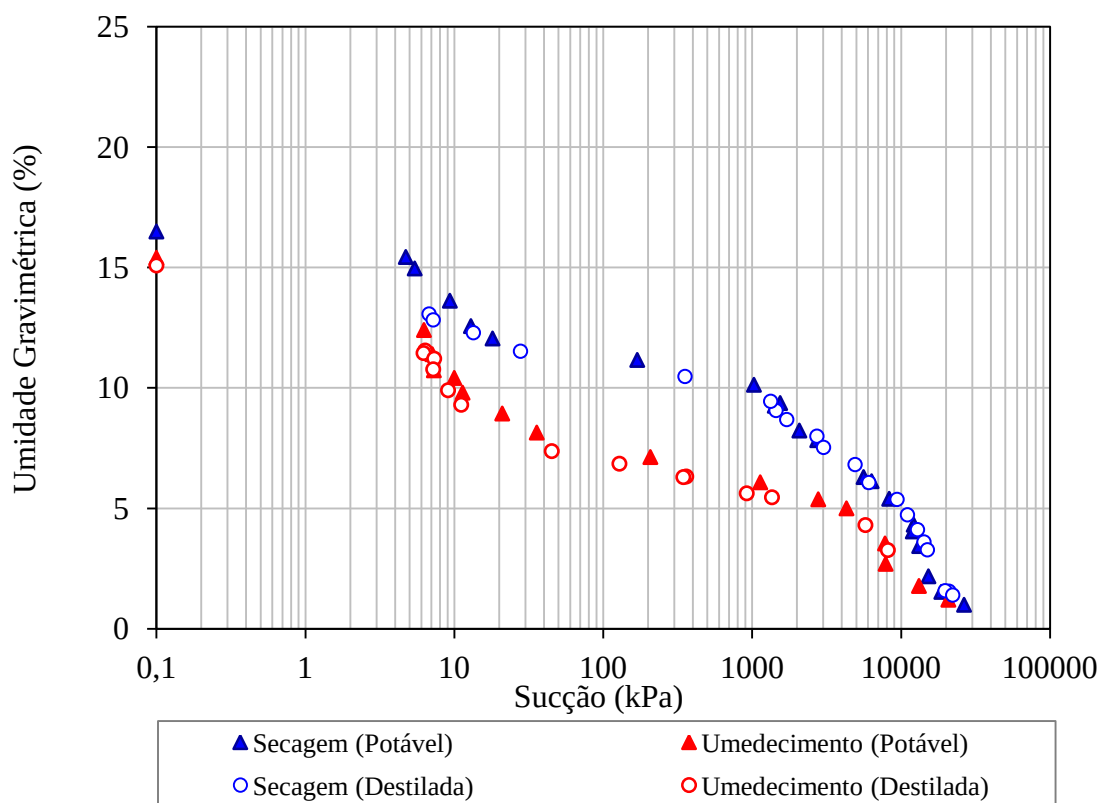


Figura 5.9 — Gráfico dos pontos obtidos para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.

Ajuste pela equação de Van Genuchten (1980)

A **Figura 5.10** é mostrada as curvas de ajuste e os pontos obtidos experimentalmente para o solo do Aterro de Bauru através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada. Os parâmetros de ajuste são apresentados na **Tabela 5.11**.

As curvas obtidas se ajustaram bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,966.

As curvas obtidas equiparam-se à curva típica de solos arenosos, assim como o solo A. No gráfico é possível observar duas pressões de entradas de ar, a primeira é de, aproximadamente, 3 kPa, e a segunda pressão de entrada de ar é de, aproximadamente, 2 MPa.

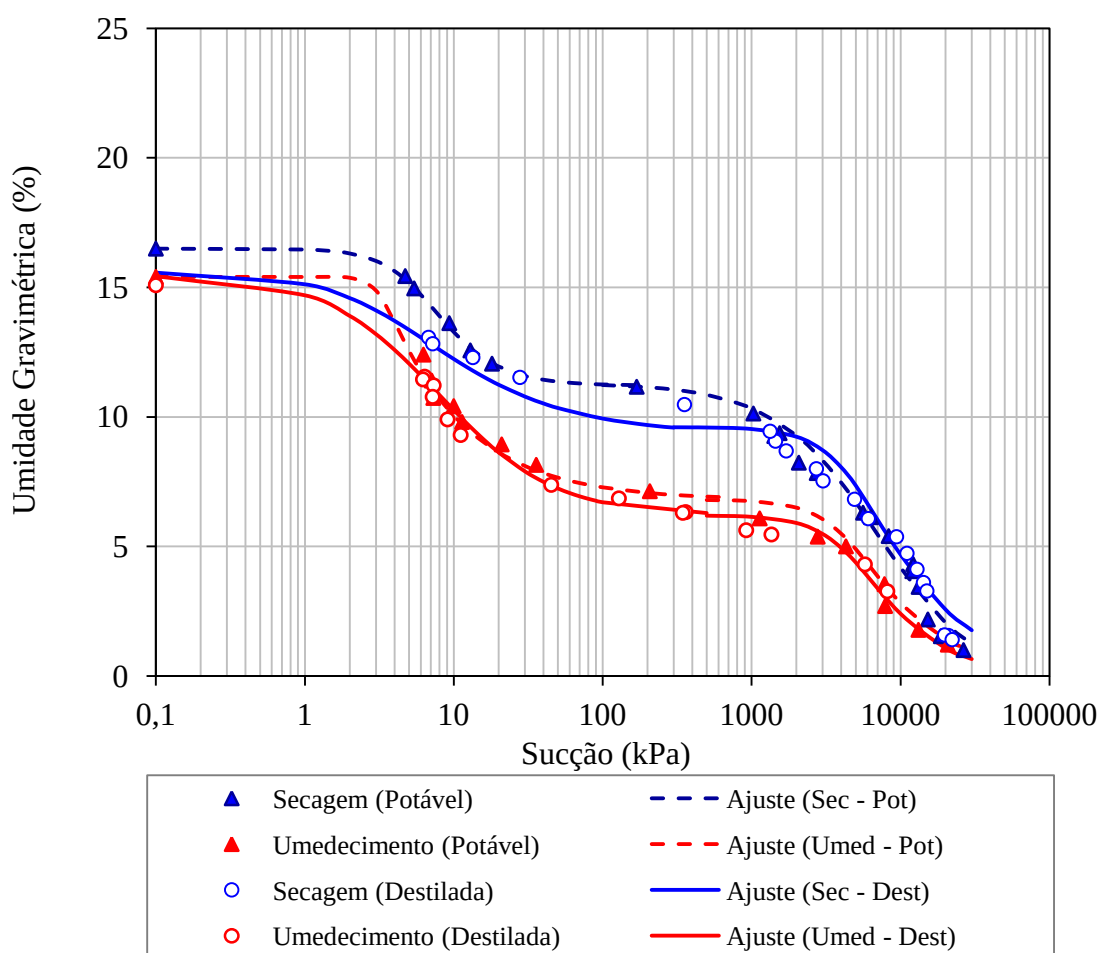


Figura 5.10 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.

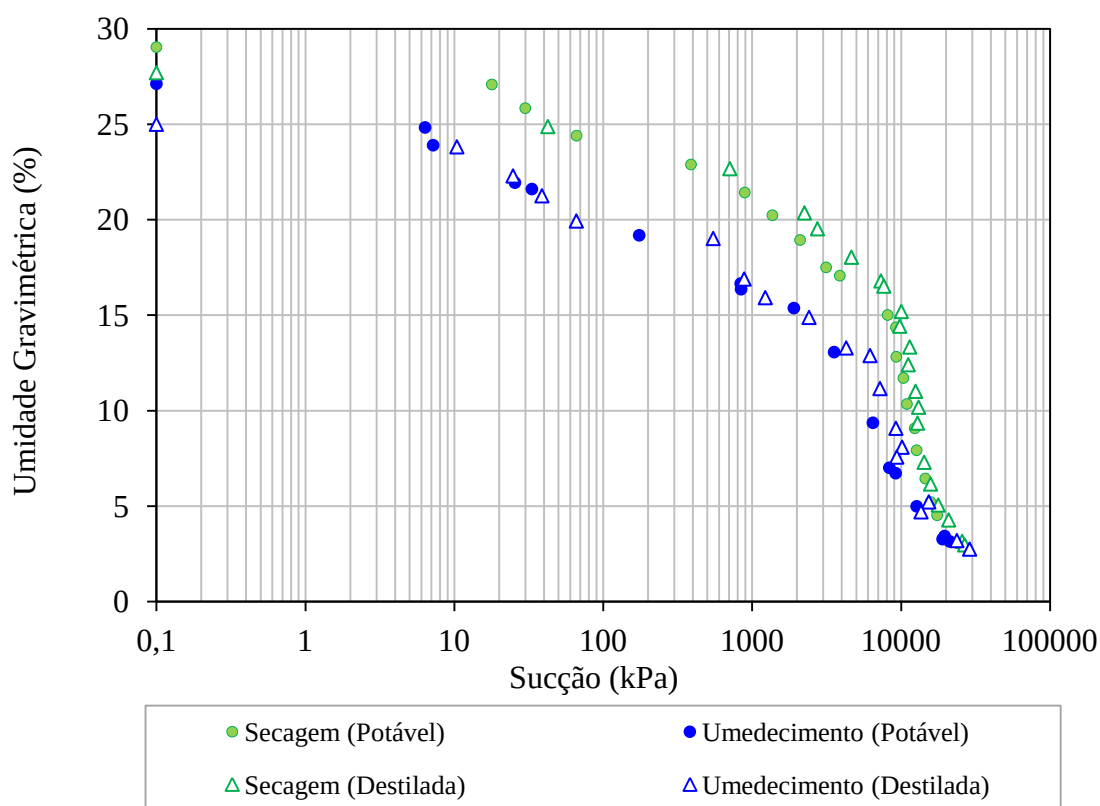
Nas curvas do solo B pode ser observada a presença de histerese entre as curvas da trajetória de secagem e umedecimento, tanto para a amostra com água destilada como para a amostra com água potável. Por outro lado, analisando separadamente cada trajetória, não houve diferença significativa nas curvas em função do tipo de fluido, potável ou destilada.

Tabela 5.11 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo B.

Trajétória	Trecho	α (kPa ⁻¹)	m	n	w_r (%)	w_s (%)	R^2
Água Potável	secagem	1	0,152	0,6977	2,4762	11,2	0,996
		2	0,0001	1,4349	1,189	0,0	0,976
	umedecimento	1	0,3237	0,1061	7,7924	6,8	0,994
		2	0,0002	0,4993	2,4999	0,3	0,974
Água Destilada	secagem	1	0,2182	0,5844	1,2707	9,3	0,998
		2	0,0002	0,3858	2,4393	0,0	0,966
	umedecimento	1	0,1248	1	1,134	6,2	0,977
		2	0,0002	0,4999	2,4996	0	0,973

SOLO C - Aeroporto Estadual de Piracicaba / Pedro Morganti

A **Figura 5.11** ilustra os pontos obtidos para o solo do Aeroporto Estadual de Piracicaba através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada.

**Figura 5.11** – Gráfico da Curva de retenção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Destilada e Potável.

Ajuste pela equação de Van Genuchten (1980)

Na **Figura 5.12** é mostrada as curvas de ajuste e os pontos obtidos experimentalmente para o solo do Aeroporto de Piracicaba através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada. Os parâmetros de ajuste são apresentados na **Tabela 5.12**.

As curvas obtidas se ajustaram bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,966.

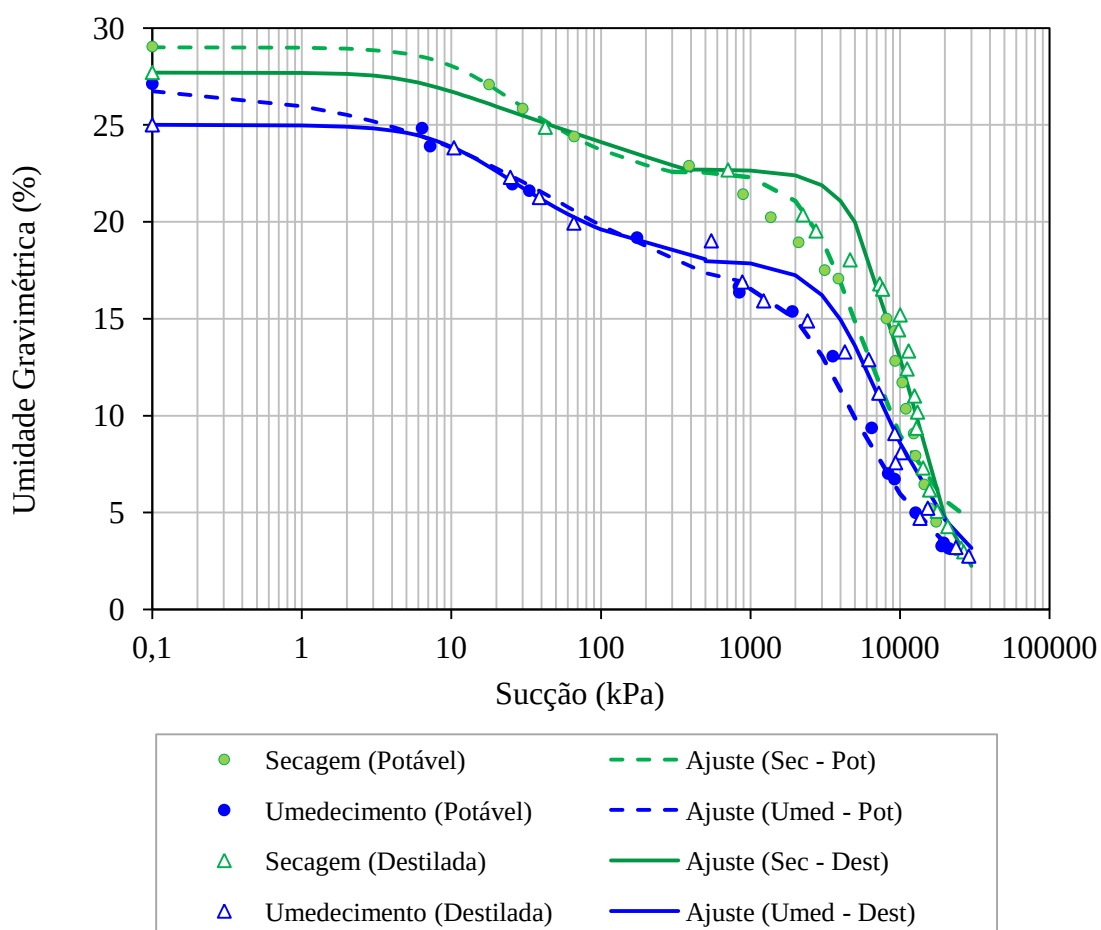


Figura 5.12 -- Gráfico dos ajustes obtidos para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e água Destilada.

Tabela 5.12 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo C.

Trajetória		Trecho	α (kPa ⁻¹)	m	n	w_r (%)	w_s (%)	R^2
Água Potável	secagem	1	0,0669	0,3421	1,8113	21,4	29,0	0,985
		2	0,00025	0,4974	2,4974	3,0	22,6	0,976
	umedecimento	1	0,0004	6,7127	0,522	16,4	27,1	0,997
		2	0,00035	0,3488	2,3578	0,0	17,0	0,976
Água Destilada	secagem	1	0,2015	0,0202	2,2818	0,0	27,7	0,998
		2	0,0001	0,8088	2,5524	0,0	22,7	0,966
	umedecimento	1	0,0786	0,2977	1,7731	16,9	25,0	0,984
		2	0,0002	0,4035	2,3955	0,0	18,0	0,976

As curvas obtidas equiparam-se à curva típica de solos argilosos, apresentada por Fredlund e Xing (1994), **Figura 3.16**. Este tipo de curva devido a maior capacidade de retenção apresenta uma grande variação de pressões de sucção em um pequeno intervalo de variação de umidade. A partir do gráfico é possível observar duas pressões de entradas de ar, a primeira é de, aproximadamente, 11 kPa, e a segunda pressão de entrada de ar é de, aproximadamente, 6 MPa.

Nas curvas do solo C pode ser observada a presença de histerese entre as curvas da trajetória de secagem e umedecimento, tanto para a amostra com água destilada como para a amostra com água potável.

Comparação entre as amostras compactadas

Foram necessários dois ajustes para cada curva dos solos A e B, pelo fato do solo apresentar duas pressões de entradas de ar, ou seja, um comportamento bimodal. Esse comportamento é atribuído à presença de macros e microporos no solo.

Rodrigues (2007) comenta que, a estrutura de vários solos lateríticos é formada por partículas maiores (areia), que podem estar cimentadas por partículas de argila e silte em estado agregado. Também devido ao intemperismo típico do clima tropical, este solo

apresenta, comumente, alta formação e concentração de óxidos, que agem como cimentos naturais. Esse efeito pode ser verificado observando as curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de defloculante (**Figuras 5.1 a 5.3**), pois a fração fina ocupa a posição de partículas maiores na escala granulométrica devido às concreções.

As curvas obtidas para os solos A e B assemelham-se à curva típica de solos arenosos com baixa capacidade de retenção de água, apresentada por Fredlund e Xing(1994) na **Figura 3.16**, o que condiz com o solo estudado. Estas curvas apresentam uma zona de dessaturação praticamente vertical em uma grande variação de umidade para um pequeno intervalo de sucção, que varia de 1 a 10 kPa, e uma zona de saturação residual onde ocorre o oposto, ou seja, para pequenas mudanças do conteúdo de água ocorrem grandes mudanças de sucção. Duas entradas de ar são observadas nessas curvas, sendo que a segunda entrada de ar pode ser atribuída à drenagem dos microporos da fração agregada do solo.

As curvas obtidas para o solo C assemelharam-se com a curva típica para solo argiloso, ou seja, apresentando uma grande variação de pressões de sucção em um pequeno intervalo de variação de umidade. Onde as pressões de entradas de ar são mais elevadas do que para os solos arenosos.

Verificam-se, nas **Figuras 5.10 e 5.12**, pelas curvas que a retenção de água tanto para amostra B como para a amostra C seguem a mesma trajetória tanto com água destilada como com água de abastecimento, sendo possível verificar a presença de histerese nas curvas quando comparada a trajetória de secagem e umedecimento.

Por outro lado, na Amostra A, não foi possível verificar histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento, seguindo as mesmas trajetórias tanto para água destilada quanto para água potável.

Nas **Tabelas 5.13 a 5.15** estão todas as equações encontradas para as amostras compactadas. Observando as equações e os gráficos, obtidos para as três amostras é possível notar que as curvas não apresentam grandes diferenças quando se utilizou água destilada ou potável. Para os solos arenosos, amostra A e B, os ajustes apresentam um padrão mais claro e foram realizados com mais facilidade. No entanto para a amostra C, argilosa, os ajustes seguem a mesma tendência, porém as equações não possuem parâmetros tão próximos como os dos solos arenosos.

Tabela 5.13 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A.

Trajetória		Trecho	Equação
Água Potável	secagem	1	$w = 0,046 + 0,089 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,4274 \cdot s)^{7,4198}]^{0,0881}} \right\}$
		2	$w = 0,048 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,4338}]^{0,8943}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,044 + 0,086 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,4862 \cdot s)^{6,9541}]^{0,085}} \right\}$
		2	$w = 0,046 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,5068}]^{0,5302}} \right\}$
Água Destilada	secagem	1	$w = 0,05 + 0,102 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,602 \cdot s)^{6,8641}]^{0,089}} \right\}$
		2	$w = 0,053 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{4,9647}]^{0,2524}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,046 + 0,102 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,5012 \cdot s)^{6,6641}]^{0,1321}} \right\}$
		2	$w = 0,047 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0003 \cdot s)^{2,4947}]^{0,4924}} \right\}$

Tabela 5.14 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo B.

Trajetória		Trecho	Equação
Água Potável	secagem	1	$w = 0,112 + 0,053 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,152 \cdot s)^{2,4762}]^{0,6977}} \right\}$
		2	$w = 0,113 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0001 \cdot s)^{1,189}]^{1,4349}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,068 + 0,086 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,3237 \cdot s)^{7,7924}]^{0,1061}} \right\}$
		2	$w = 0,04668 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,4999}]^{0,4993}} \right\}$
Água Destilada	secagem	1	$w = 0,093 + 0,063 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2182 \cdot s)^{1,2707}]^{0,5844}} \right\}$
		2	$w = 0,096 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,4393}]^{0,3858}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,062 + 0,093 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,1248 \cdot s)^{1,134}]^1} \right\}$
		2	$w = 0,062 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,4996}]^{0,4999}} \right\}$

Tabela 5.15 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo C.

Trajetória		Trecho	Equação
Água Potável	secagem	1	$w = 0,214 + 0,076 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0669 \cdot s)^{1,8113}]^{0,3421}} \right\}$
		2	$w = 0,003 + 0,196 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,4974}]^{0,4974}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,164 + 0,107 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0004 \cdot s)^{0,522}]^{6,7127}} \right\}$
		2	$w = 0,17 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0003 \cdot s)^{2,3578}]^{0,3488}} \right\}$
Água Destilada	secagem	1	$w = 0,277 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2015 \cdot s)^{2,2818}]^{0,0202}} \right\}$
		2	$w = 0,227 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,5524}]^{0,8088}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,169 + 0,081 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0786 \cdot s)^{1,7731}]^{0,2977}} \right\}$
		2	$w = 0,18 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,3955}]^{0,4035}} \right\}$

5.5.2 Amostra indeformada

SOLO A - Processo erosivo no córrego Água comprida - Solo Indeformado

A **Figura 5.13** ilustra os pontos obtidos para o solo indeformado da Erosão próximo ao córrego Água comprida em Bauru através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água destilada e água potável.

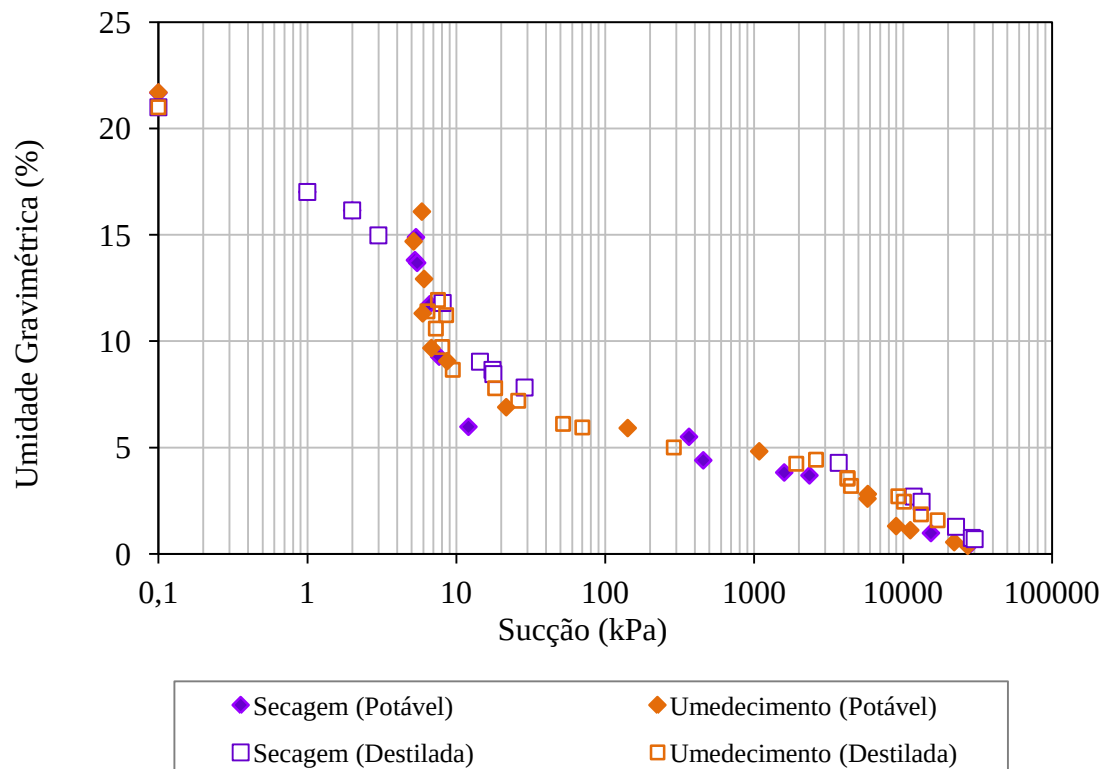


Figura 5.13 – Gráfico da Curva de retenção para o solo A indeformado através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Destilada.

Ajuste pela equação de Van Genuchten (1980)

Na **Figura 5.14** são mostradas as equações de ajuste e os pontos obtidos experimentalmente para o solo da erosão ao longo do córrego através das trajetórias de secagem e umedecimento utilizando água potável e água destilada. Os parâmetros de ajuste são apresentados na **Tabela 5.16** e na **Tabela 5.17** estão apresentadas as equações.

As curvas obtidas se ajustaram bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,886.

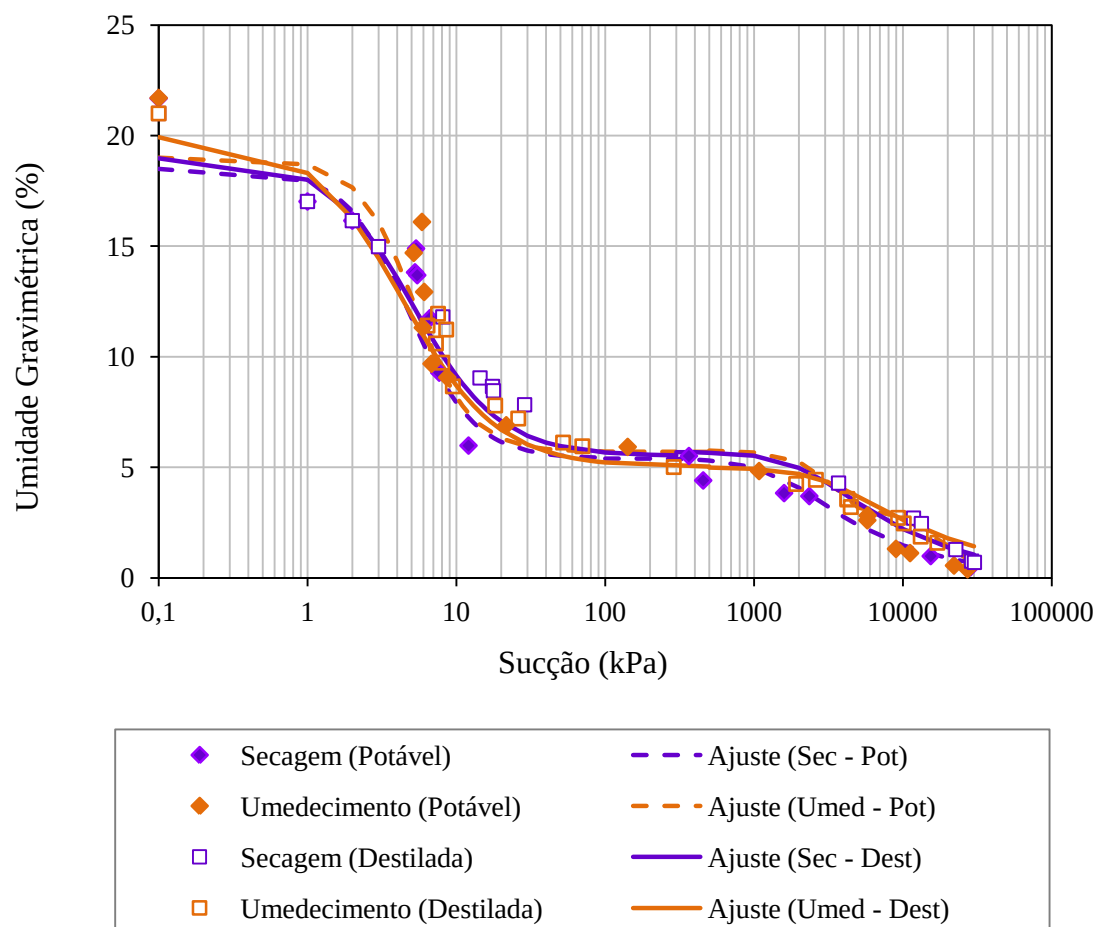


Figura 5.14 – Curvas de Retenção de água no solo para a amostra A indeformada - Trajetórias de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

Tabela 5.16 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado.

Trajetória		Trecho	α (kPa ⁻¹)	m	n	w_r (%)	w_s (%)	R^2
Água Potável	secagem	1	0,209	0,98	2,00	5,4	18,5	0,991
		2	0,0006	0,3004	2,4122	0,0	5,4	0,983
	umedecimento	1	0,1918	0,9924	2,278	5,7	19	0,886
		2	0,0002	1,1375	1,2985	0	6	0,991
Água Destilada	secagem	1	0,2068	0,9279	1,5543	5,5	19,0	0,92
		2	0,0004	0,2898	2,3379	0,0	5,7	0,989
	umedecimento	1	0,2383	0,9489	1,4	5	20,0	0,974
		2	0,0003	0,2382	2,3918	0	5	0,972

Tabela 5.17 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado.

Trajetória		Trecho	Equação
Água Potável	secagem	1	$w = 0,054 + 0,131 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0209 \cdot s)^{2,0}]^{0,98}} \right\}$
		2	$w = 0,054 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0006 \cdot s)^{2,4122}]^{0,3004}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,057 + 0,133 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,1918 \cdot s)^{2,278}]^{0,9924}} \right\}$
		2	$w = 0,6 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{1,2985}]^{1,1375}} \right\}$
Água Destilada	secagem	1	$w = 0,055 + 0,135 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2068 \cdot s)^{1,5543}]^{0,9279}} \right\}$
		2	$w = 0,055 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0004 \cdot s)^{2,3379}]^{0,2898}} \right\}$
	umedecimento	1	$w = 0,05 + 0,15 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2383 \cdot s)^{1,4}]^{0,9489}} \right\}$
		2	$w = 0,05 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0003 \cdot s)^{2,3918}]^{0,2382}} \right\}$

A compactação do solo diminuiu seu índice de vazios, ou seja, diminuiu os poros, implicando numa diminuição da quantidade de água necessária para saturar o solo. Isso pode ser notado comparando os gráficos anteriores, **Figura 5.8**, em que o valor da umidade de saturação para o solo compactado é menor em relação ao solo indeformado, **Figura 5.14**. Também é possível notar que diferença entre as curvas do solo indeformado e compactado é mais evidente no trecho inicial, **Figura 5.15**.

A partir dos gráficos, a primeira pressão de entrada de ar é de, aproximadamente, 2 KPa. E a segunda pressão de entrada de ar é de, aproximadamente, 1 MPa.

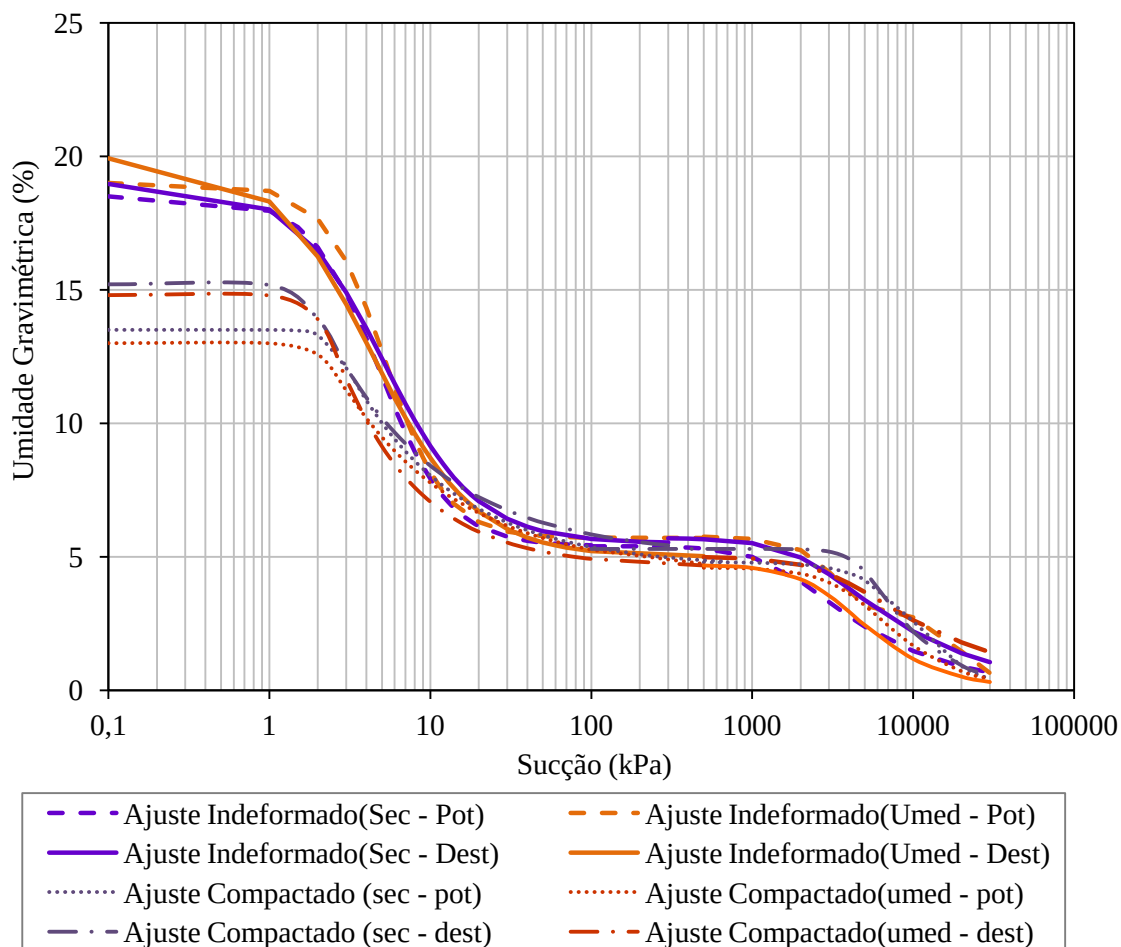


Figura 5.15 – Curvas de Retenção de água no solo para a amostra A indeformada e Compactada - Trajetórias de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

Na **tabela 5.18**, pode-se observar as equações obtidas para o solo A, indeformado e compactado. As curvas possuem certa semelhança na maioria dos parâmetros da equação de ajuste. A diferença está no valor de umidade inicial W_s , no primeiro trecho das curvas, que representa a diferença visualizada no primeiro trecho das curvas. Essa diferença ocorre, uma vez que a compactação leva a diminuição dos macroporos, portanto, a umidade inicial do primeiro trecho é menor no solo compactado. Porém, quando se observa a umidade residual W_r , pode-se verificar que tanto para a amostra indeformada quanto para a compactada, os valores estão próximos de 5%. E a partir desse ponto as curvas obtidas se tornam muito semelhantes.

Os resultados obtidos corroboram com Camapum de Carvalho *et al*(2014) que salienta que em solos intemperizados, mantendo-se as agregações presentes no solo, isto é, sem utilização de defloculantes, a compactação interferirá predominantemente na macroporosidade, fazendo com que o solo alcance a saturação com menores teores de umidade.

Tabela 5.18 – Equação ajustada de Van Genuchten(1980) para o Solo A indeformado e compactado.

		Trajectoria	Trecho	Equação
Indeformada	Água Potável	secagem	1	$w = 0,054 + 0,131 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0209 \cdot s)^{2,0}]^{0,98}} \right\}$
			2	$w = 0,054 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0006 \cdot s)^{2,4122}]^{0,3004}} \right\}$
		umedecimento	1	$w = 0,057 + 0,133 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,1918 \cdot s)^{2,278}]^{0,9924}} \right\}$
			2	$w = 0,6 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{1,2985}]^{1,1375}} \right\}$
	Água Destilada	secagem	1	$w = 0,055 + 0,135 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2068 \cdot s)^{1,5543}]^{0,9279}} \right\}$
			2	$w = 0,055 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0004 \cdot s)^{2,3379}]^{0,2898}} \right\}$
		umedecimento	1	$w = 0,05 + 0,15 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,2383 \cdot s)^{1,4}]^{0,9489}} \right\}$
			2	$w = 0,05 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0003 \cdot s)^{2,3918}]^{0,2382}} \right\}$
Compactada	Água Potável	secagem	1	$w = 0,046 + 0,089 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,4274 \cdot s)^{7,4198}]^{0,0881}} \right\}$
			2	$w = 0,048 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0001 \cdot s)^{2,4338}]^{0,8943}} \right\}$
		umedecimento	1	$w = 0,044 + 0,086 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,4862 \cdot s)^{6,9541}]^{0,085}} \right\}$
			2	$w = 0,046 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{2,5068}]^{0,5302}} \right\}$
	Água Destilada	secagem	1	$w = 0,05 + 0,102 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,602 \cdot s)^{6,8641}]^{0,089}} \right\}$
			2	$w = 0,053 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0002 \cdot s)^{4,9647}]^{0,2524}} \right\}$
		umedecimento	1	$w = 0,046 + 0,102 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,5012 \cdot s)^{6,6641}]^{0,1321}} \right\}$
			2	$w = 0,047 \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (0,0003 \cdot s)^{2,4947}]^{0,4924}} \right\}$

5.6 Ensaios de Resistividade Elétrica

Como descrito anteriormente os ensaios de resistividade elétrica foram realizados durante o ensaio de papel filtro. Seguem os resultados obtidos.

5.6.1 Amostras Compactadas

A leitura da resistividade elétrica das amostras foi realizada durante o ensaio de curva de retenção como descrito anteriormente. Assim é possível relacionar a resistividade com os índices físicos das amostras obtidos através de correlações.

Resistividade versus teor de umidade:

A umidade gravimétrica de uma amostra de solo é a relação entre a massa da água e a dos sólidos nela contidos. E sabendo que a quantidade de água presente nas amostras influencia diretamente as leituras de resistividade elétrica, foram feitas análises com relação ao teor de umidade gravimétrico.

Analisando os gráficos das **Figuras 5.16 a 5.21** verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica da amostra A, arenosa, sofre uma mudança drástica a partir do ponto de teor de umidade da ordem de 6%. Por outro lado, para a amostra B, arenosa, e C, argilosa, esse ponto de mudança está próximo do teor de umidade de 9%. Essa diferença ocorre provavelmente devido à diferença da composição granulométrica das amostras e da quantidade de argila presente nas mesmas. Dessa maneira, se pode considerar que a relação entre a resistividade elétrica do solo e o teor de umidade pode ser dividida em dois trechos.

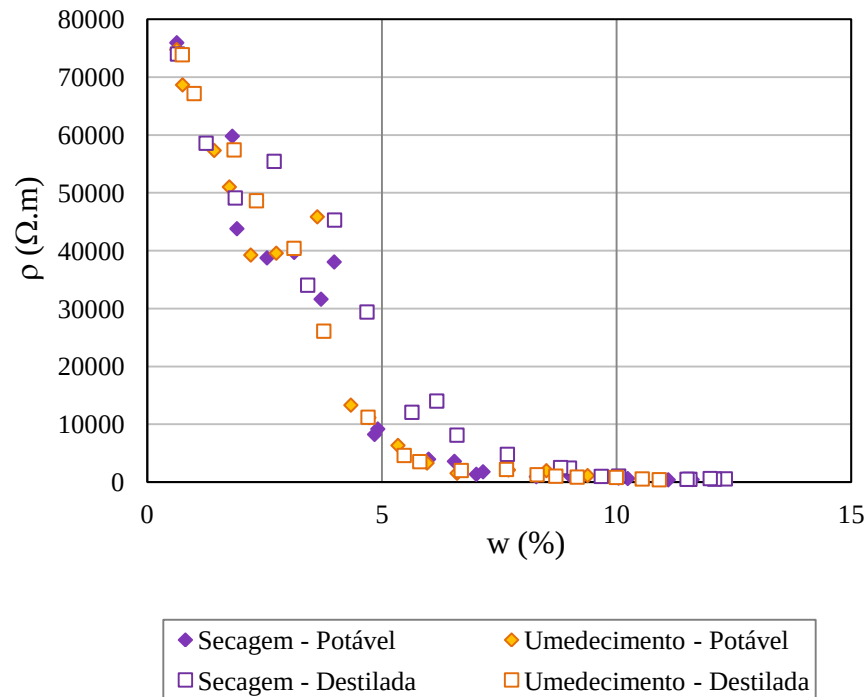


Figura 5.16 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

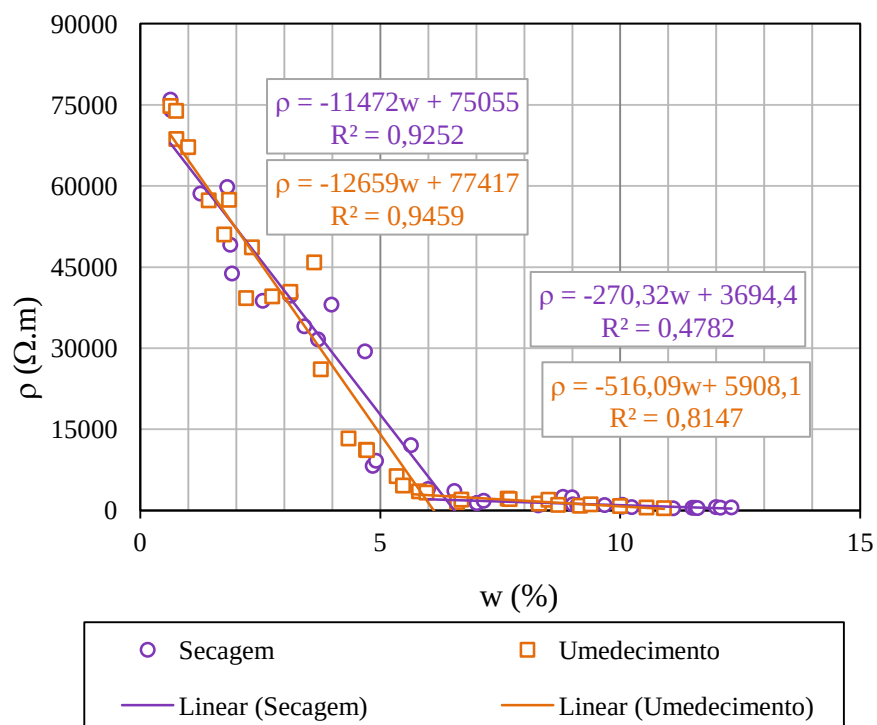


Figura 5.17 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

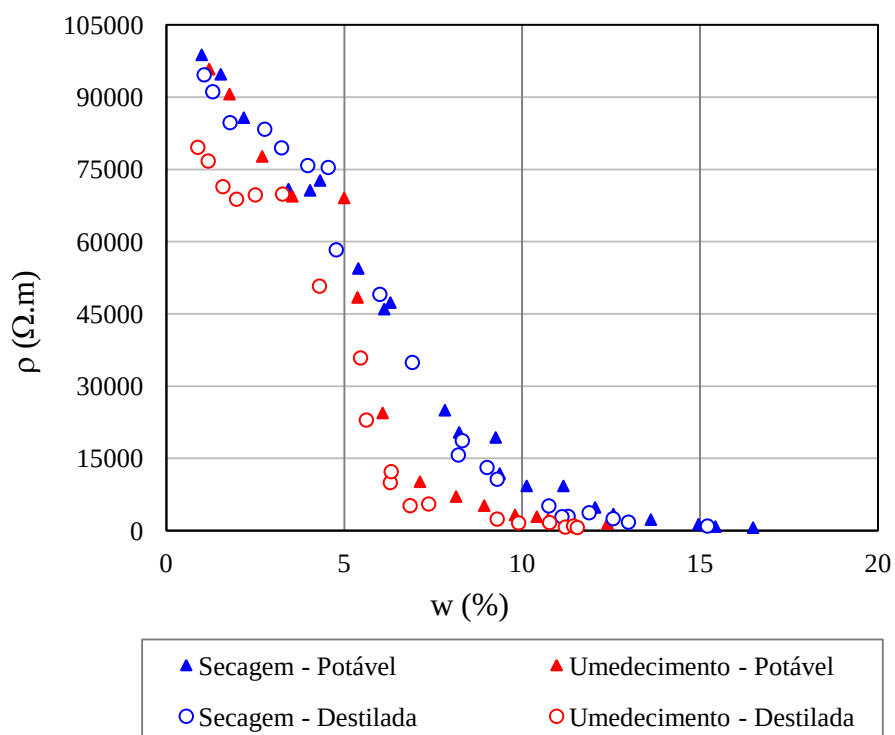


Figura 5.18– Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

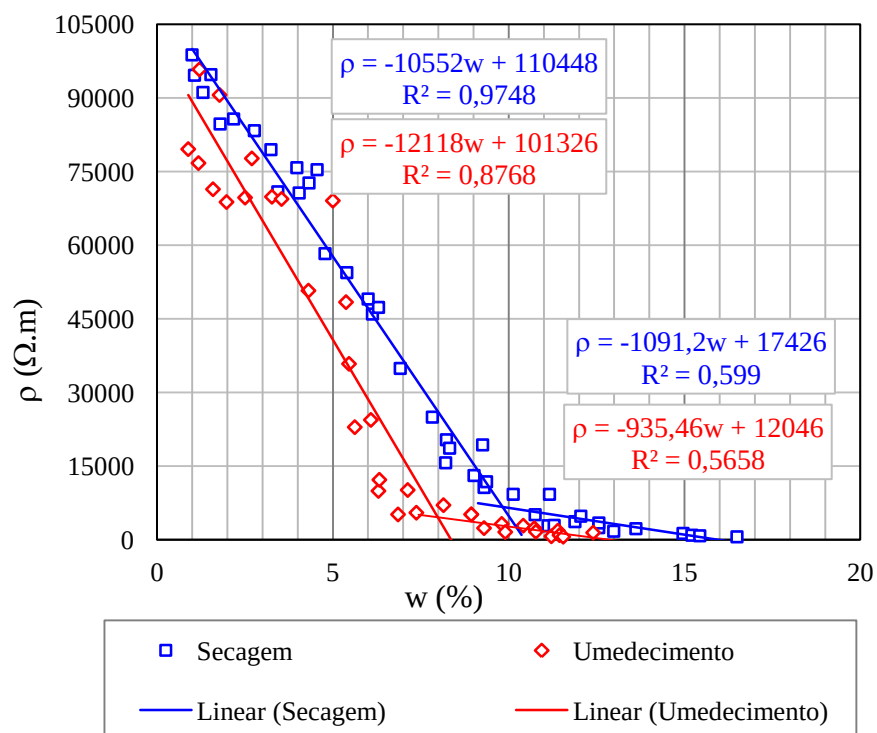


Figura 5.19 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

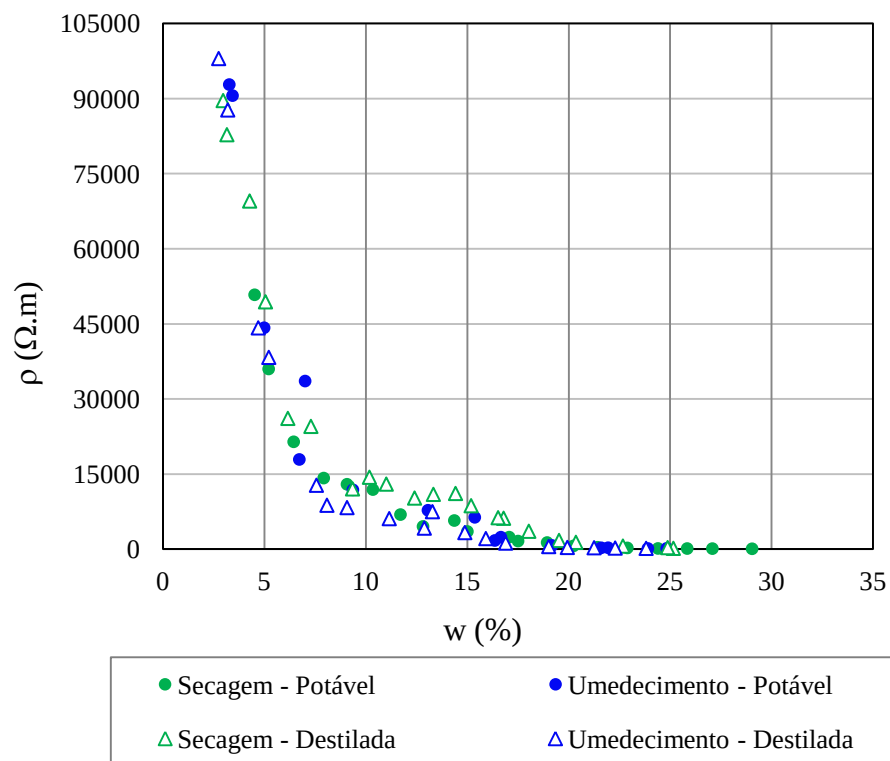


Figura 5.20 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

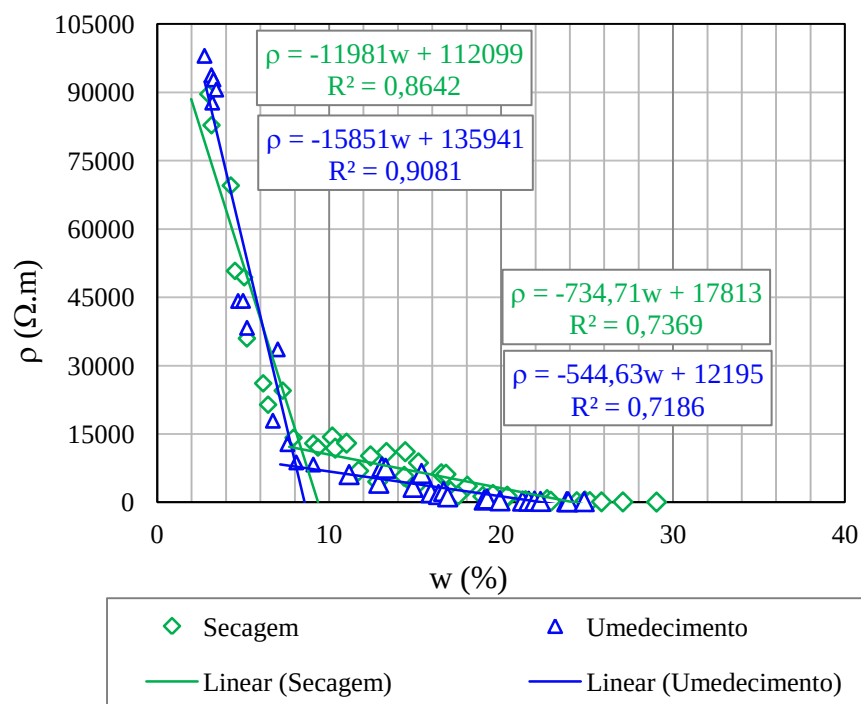


Figura 5.21 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

No trecho onde as umidades estão abaixo do ponto de inflexão, da ordem de 6% para o solo A e da ordem de 9% para o solo B e C, observa-se uma grande variação dos valores de resistividade, onde ocorre a perda da continuidade dos caminhos de água no solo promovendo o aumento brusco nos valores de resistividade. Nos trechos com umidades acima do ponto de inflexão os valores obtidos para resistividade sofrem pouca variação abaixo de $15.000\Omega.m$, onde tem-se a continuidade da água.

Resistividade versus Grau de Saturação:

Nas **Figuras 5.22 a 5.27** são apresentadas as curvas de resistividade versus grau de saturação, onde as medidas foram obtidas durante os ensaios de sucção com a leitura de resistividade e os ajustes obtidos para as mesmas.

Pode-se observar que nas amostras compactadas a mudança ocorre quando o grau de Saturação está em torno de 30% a 40%. Analisando os gráficos a seguir em conjunto com os gráficos anteriores de Resistividade versus teor de umidade, pode-se notar que os pontos de inflexão das curvas coincidem.

Para o solo A, no primeiro trecho onde o grau de saturação está abaixo de 40%, ocorre a leitura de resistividades mais altas devido à presença de ar nos poros. Já no trecho com grau de saturação acima de 40%, pode se observar a leitura de resistividades mais baixas e com pouca variação, indicando a continuidade da água nos canalículos do solo. Esse ponto de inflexão na curva pode indicar o momento quando ocorre a descontinuidade da água presente nos poros e corresponde ao teor de umidade da ordem de 6%.

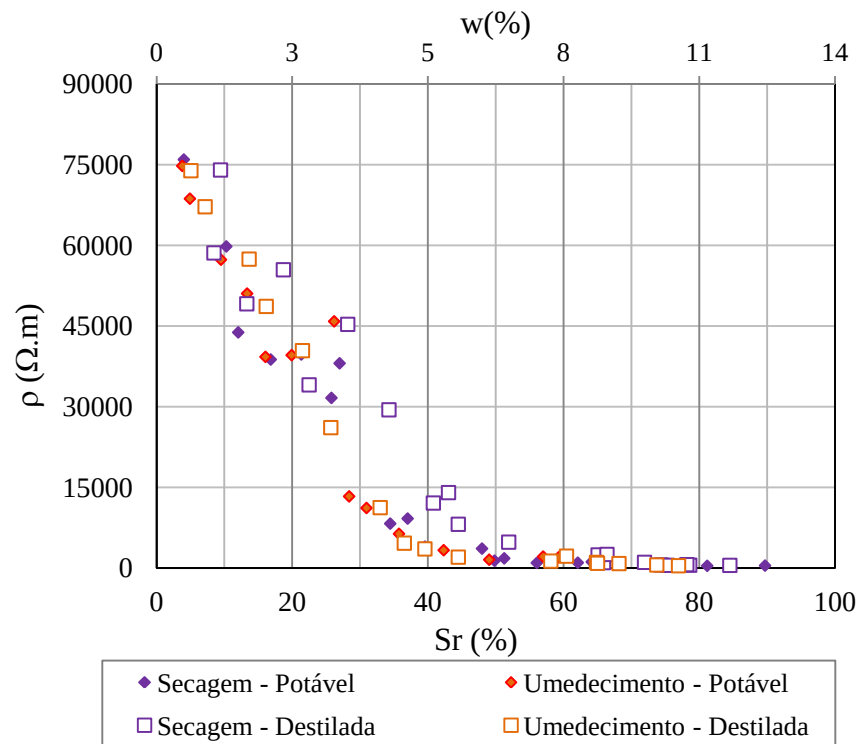


Figura 5.22 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

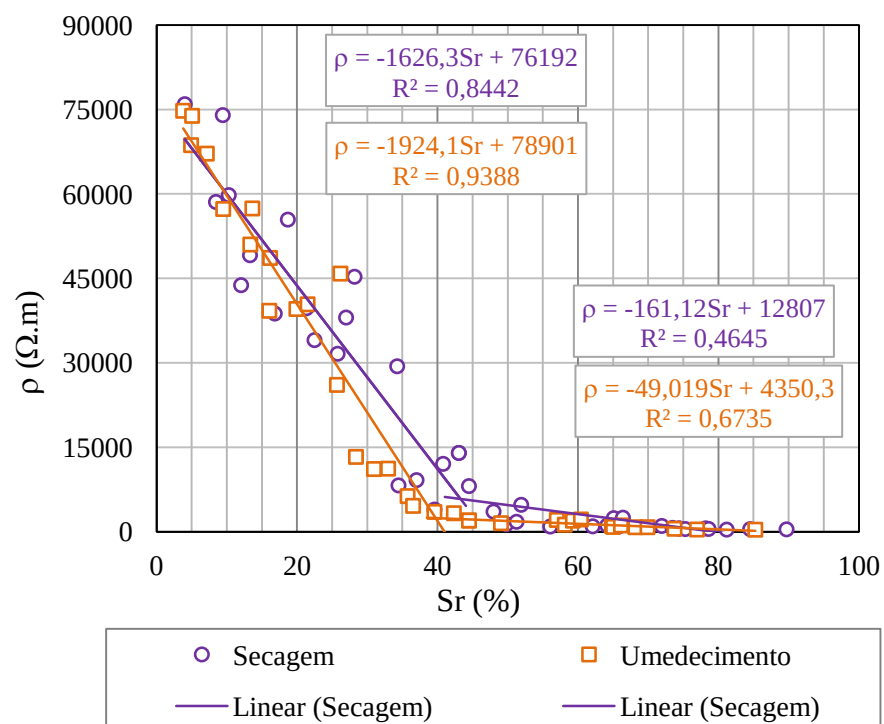


Figura 5.23 – Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

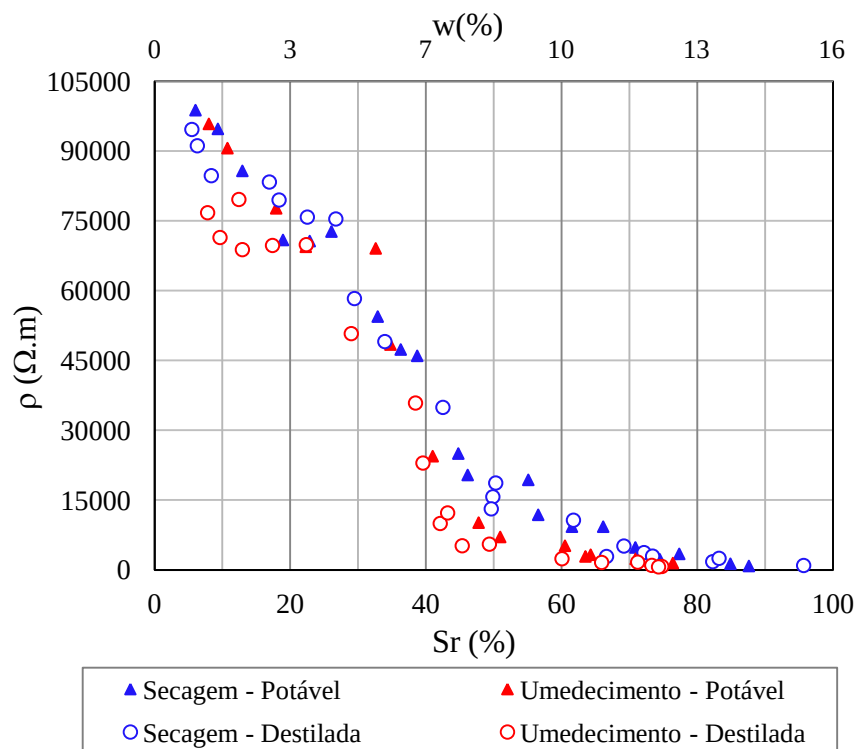


Figura 5.24 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

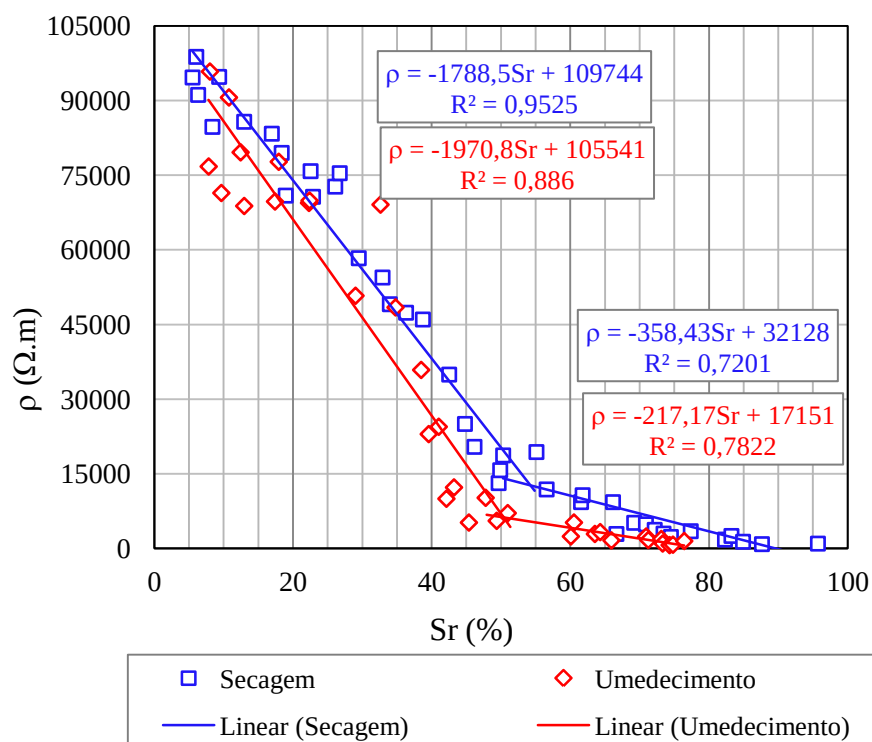


Figura 5.25 – Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

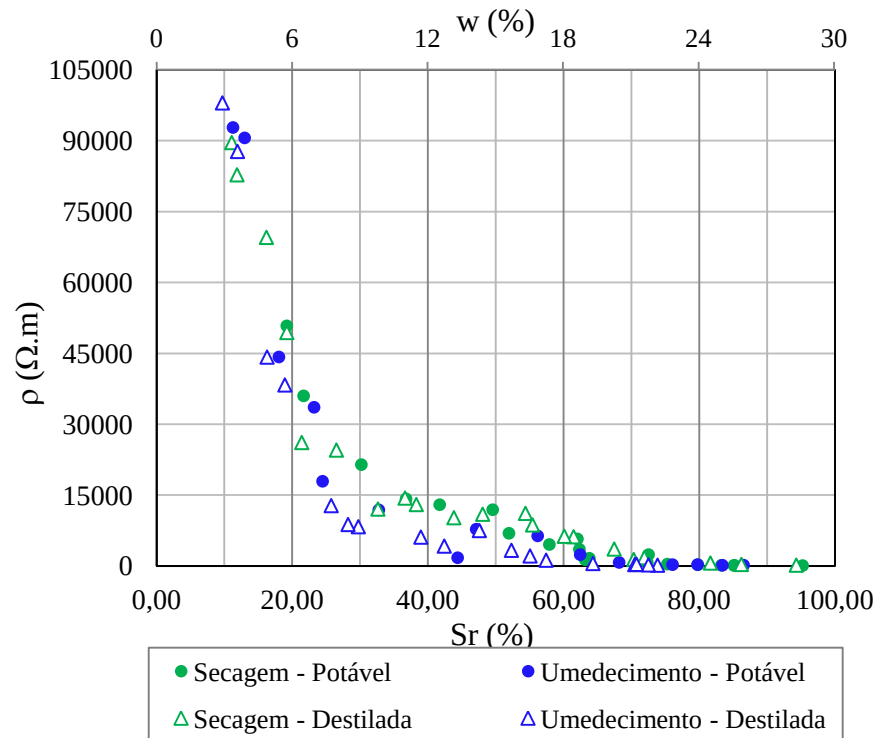


Figura 5.26 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

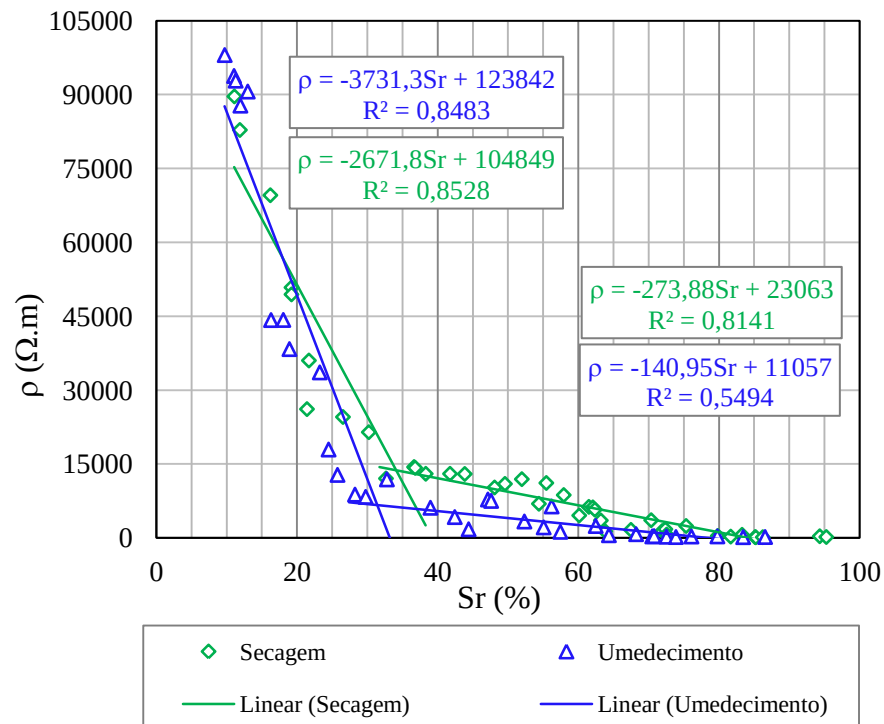


Figura 5.27– Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

No solo B, o ponto de inflexão na curva ocorre em torno de 50% de saturação e a queda nos valores de resistividade ocorre de forma mais brusca do que no solo A, essa pequena diferença pode ocorrer devido à composição do solo. Neste caso o valor do teor de umidade que correspondente ao ponto de inflexão da curva da ordem de 9%.

Já no solo C, o ponto de inflexão na curva está em torno de 35% de saturação, mas a queda dos valores de resistividade ocorre de forma mais brusca do que nos solos arenosos. Sendo um solo argiloso, o valor do teor de umidade que corresponde ao ponto de descontinuidade de água nos poros ocorre em torno de 9%, mais elevado do que as amostras arenosas. Essa diferença provavelmente ocorre pela diferença de interação das partículas de argila com a água.

Comparando os gráficos e os resultados obtidos para os três solos com as curvas granulométricas com e sem defloculante foi possível observar que: o solo A apresentou o valor do ponto de inflexão em torno de 40%, o solo B em torno de 50% e o solo C próximo a 35%. Analisando as curvas granulométricas sem o uso de defloculante, **Figuras 5.1 a 5.3**, é possível notar que o solo A apresenta uma porcentagem maior de argila não agregada do que o solo B, onde a fração de argila não aparece. Para o solo C, se observa uma porcentagem de argila não agregada superior aos Solos A e B.

Segundo Camapum de Carvalho(2010), o comportamento da partícula de argila agregada possui o comportamento de um material que transita entre o comportamento de argila e o comportamento de areia segundo a condição de hidratação em que se encontra o solo e os próprios agregados. Assim, nos solos com umidades elevadas, as partículas agregadas tenderão a se comportar como argila, e nos solos com baixa umidade tem-se comportamento de areia.

Esse comportamento descrito pode ser observado nas amostras, pois a amostra B demonstra um comportamento de um solo mais arenoso, com o grau de saturação do ponto

de inflexão maior do que as outras amostras (A e C). Isto é, a amostra B apresenta descontinuidade da água nos poros a um grau de saturação mais elevado. O solo A apresenta uma pequena quantidade de argila não agregada e assim é possível verificar que o ponto de entrada de ar se encontra em um grau de saturação mais baixo.

Na amostra C, o grau de saturação para o ponto de inflexão é ainda mais baixo do que nas outras amostras, em torno de 35%, comportamento que pode estar relacionado a quantidade de argila não agregada da amostra.

Resistividade Elétrica em função da sucção do solo

Nas **Figuras 5.28 a 5.30** são apresentadas as curvas obtidas através dos ensaios de sucção com a leitura de resistividade.

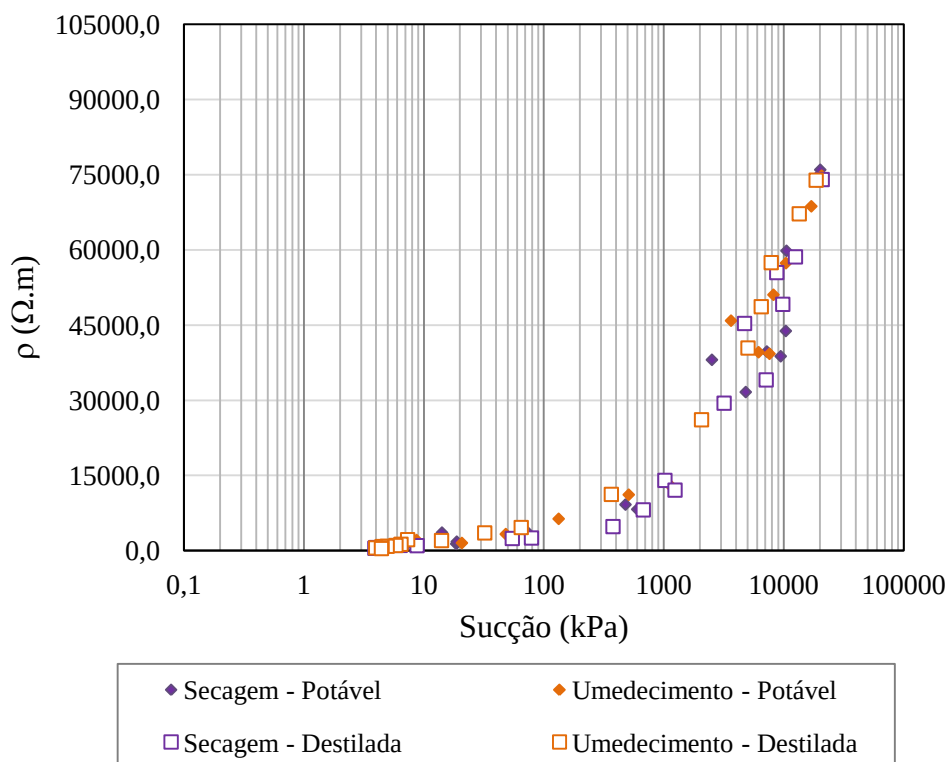


Figura 5.28 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

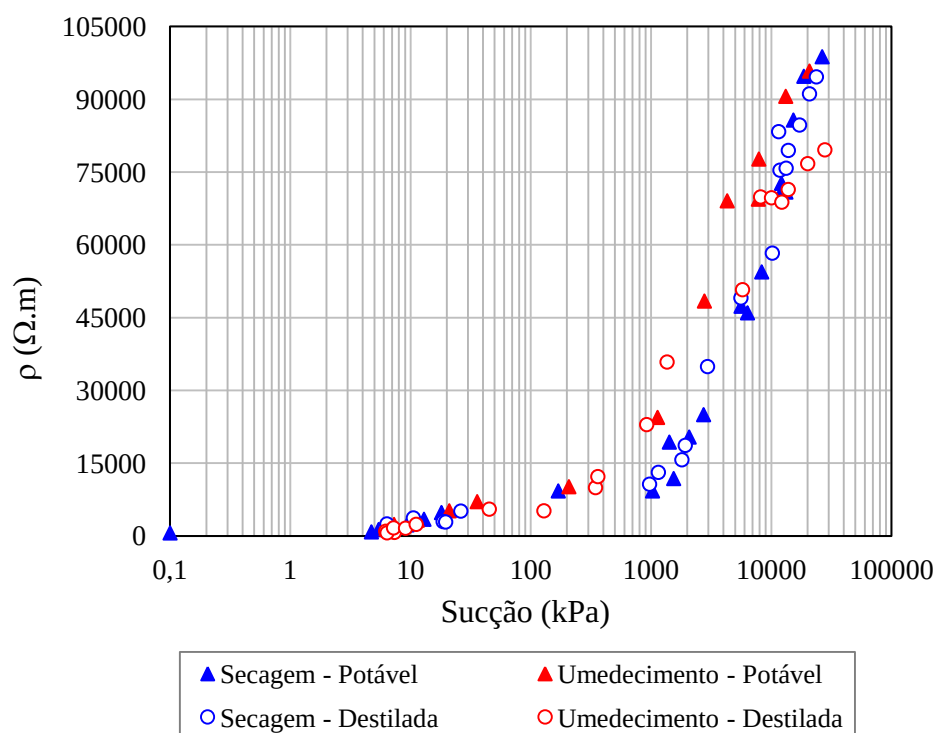


Figura 5.29 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

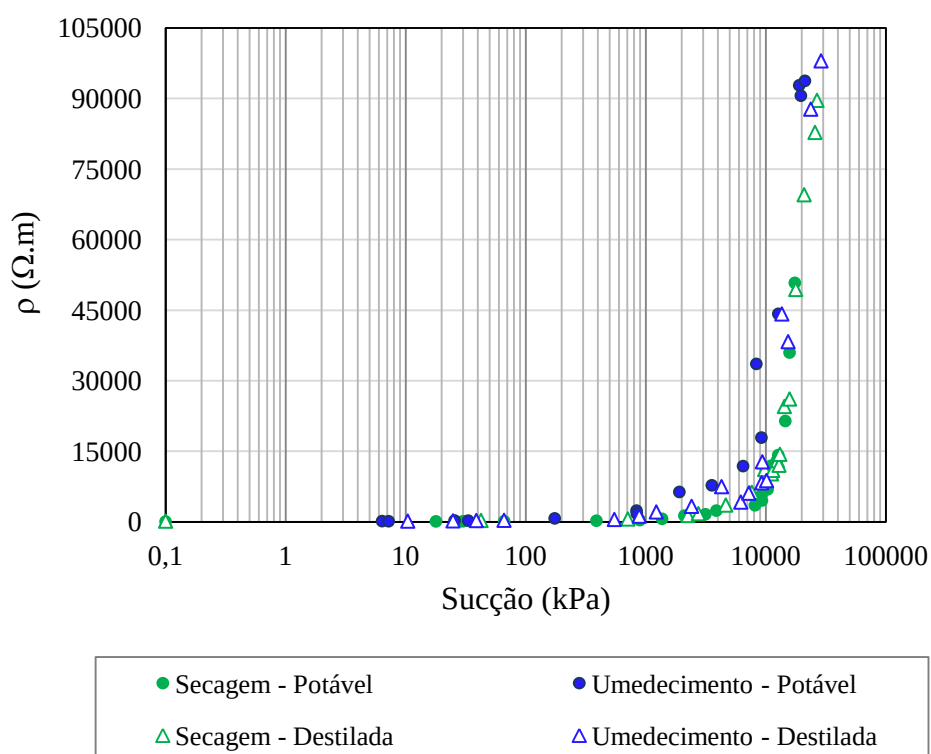


Figura 5.30 – Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

A partir dos gráficos é possível observar que o ponto de inflexão indica o momento de descontinuidade da água presente nos poros do solo. Na amostra A ocorre quando a sucção matricial atinge 1.000 kPa (1 MPa), típica de um solo arenoso com baixa capacidade de retenção de água, para amostra B ocorre em torno de 2 MPa e na amostra C quando atinge 8MPa. Coincidindo com as pressões de sucção do ponto de segunda entrada de ar, observados nas curvas de retenção de água no solo, **item 5.5.1**.

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 das amostras pode-se constatar que a resistividade aumenta quanto maior for a sucção matricial e mais seco o material estiver.

Verificando o comportamento da resistividade elétrica das amostras com relação às variações do grau de saturação, **Figuras 5.23, 5.25 e 5.27**, consideram-se estes resultados importantes para o seu entendimento.

Antes do ponto de segunda entrada de ar (microporos), a água presente nos vazios apresenta caminhos conectados que facilitam a condução de corrente elétrica por meio de eletrólise, além de responsáveis pela existência da sucção matricial na amostra pelos efeitos capilares.

Até este ponto, a relação entre a resistividade elétrica e a sucção matricial do solo tende a permanecer linear, pois ambas dependem do mesmo parâmetro, ou seja, a quantidade de água no solo. Pode ser observado que com a diminuição do grau de saturação do solo, o potencial de condução do meio diminui, aumentando assim os valores de resistividade elétrica, o mesmo acontece com a sucção matricial.

A partir do ponto de entrada de ar nos microporos, a sucção apresenta uma tendência a se manter constante ou aumentar em pequenas proporções com a diminuição

da saturação, no entanto, não ocorre o mesmo com a resistividade elétrica. Com a entrada de ar nos microporos ocorre a perda da continuidade dos caminhos de água no solo, dificultando assim, o fenômeno de condução eletrolítica.

Considerando-se que a condutividade elétrica do solo depende da quantidade de água presente nos poros e que a mesma deve estar conectada, a dessaturação dos macroporos do solo promove o aumento da resistividade elétrica e a partir do ponto onde ocorre o início da dessaturação dos microporos esse aumento torna-se substancial o que pode ser observado em todas as figuras apresentadas anteriormente.

A interação da água com as partículas de solo influencia diretamente as leituras de resistividade. Quanto maior o teor de argila presente nas amostras, mais alto é o teor de umidade máximo alcançado. Os solos A e B se comportam de forma muito semelhante, com uma pequena diferença no ponto de inflexão que ocorre para a curva do solo B na sucção igual a 2 MPa, mais elevada do que para o solo A, de 1 MPa. Uma provável explicação seria a influência do teor de argila nas amostras, uma vez que no momento em que se encontram saturadas apresentam o comportamento de argila mesmo estando agregadas a partículas maiores.

Equacionamento da resistividade Elétrica em função da sucção do solo

Para a análise dos gráficos de resistividade elétrica em função da sucção foram utilizados todos os pontos obtidos nos ensaios, separados somente pela trajetória do ensaio, isto é, secagem e umedecimento. Considerando-se que não ocorrem diferenças significativas nos valores obtidos durante os ensaios utilizando água potável ou destilada, estes foram considerados como um conjunto único de pontos.

Nas **Figuras 5.31 a 5.33** são apresentadas as curvas de resistividade em função da sucção juntamente com os ajustes obtidos.

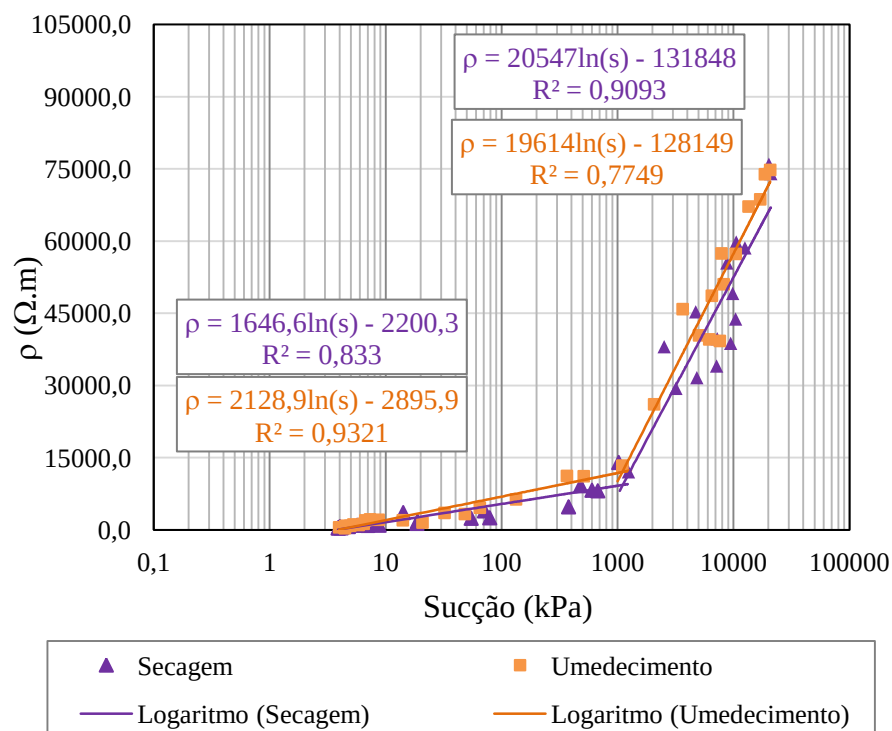


Figura 5.31 – Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A através da trajetória de secagem e umedecimento.

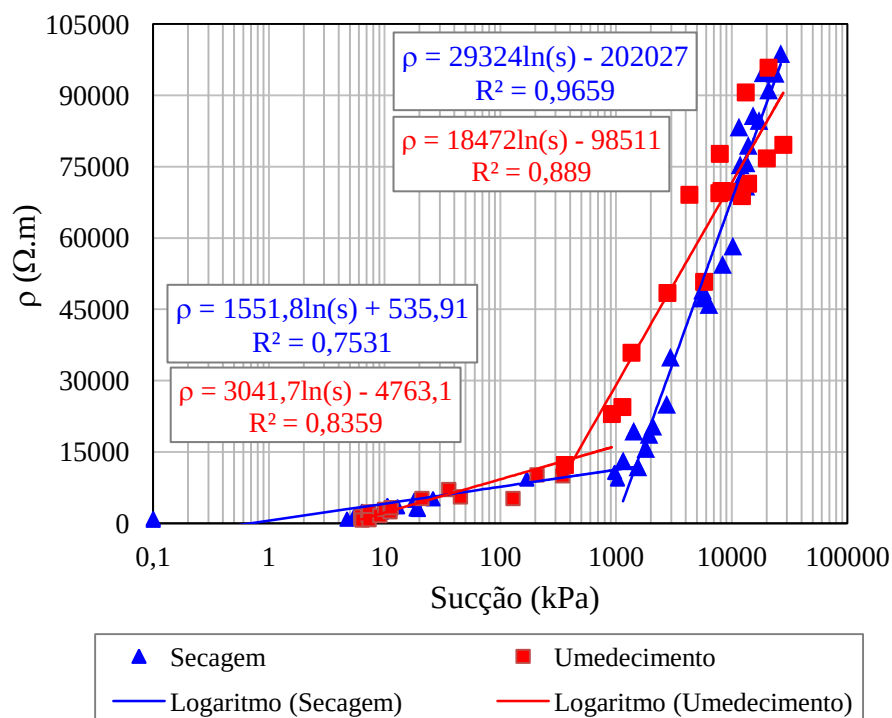


Figura 5.32 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo B através da trajetória de secagem e umedecimento.

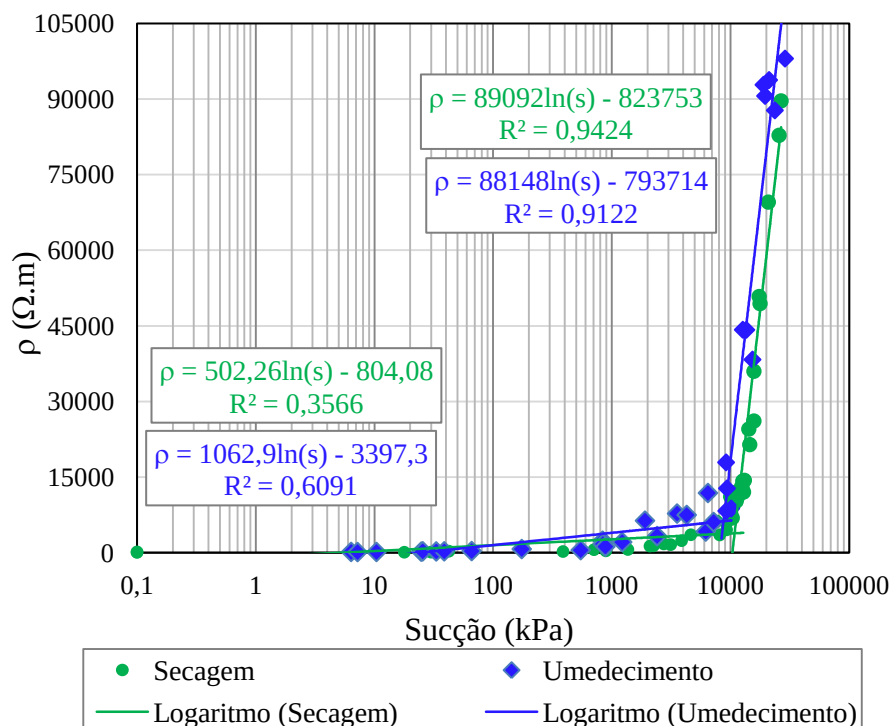


Figura 5.33 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo C através da trajetória de secagem e umedecimento.

Os ajustes obtidos para as curvas possuem coeficientes de determinação altos, e são expressas por função logarítmica. Para os solos A e B os ajustes se mostram melhores. Já para o solo C, argiloso, as curvas se ajustam melhor após o ponto de inflexão, próximo ao ponto onde ocorre a descontinuidade da água presente nos vazios do solo.

Como citado anteriormente, as três amostras apresentam o mesmo comportamento com relação à variação do grau de saturação. A partir dos ajustes apresentados é possível observar com mais clareza que o trecho com sucções menores, situados antes do ponto onde ocorre a quebra da continuidade da água nos microporos, tende a ser linear, pois ambas depende da quantidade de água presente na amostra.

O segundo trecho, após a quebra dessa continuidade, pode-se observar o aumento brusco da resistividade elétrica e os valores de sucção tendem a se manter praticamente constantes.

Na **tabela 5.19**, tem-se o resumo das equações obtidas para ajustar as curvas de resistividade versus sucção. É possível verificar que os ajustes realizados para os solos arenosos são melhores e possuem os coeficientes de determinação (R^2) mais elevados.

Tabela 5.19 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção.

Solo A	secagem	$\rho = 1646,6\ln(s) - 2200,3$ $R^2 = 0,833$ $\rho = 20547\ln(s) - 131848$ $R^2 = 0,9093$
	umedecimento	$\rho = 2128,9\ln(s) - 2895,9$ $R^2 = 0,9321$ $\rho = 19614\ln(s) - 128149$ $R^2 = 0,7749$
Solo B	secagem	$\rho = 1551,8\ln(s) + 535,91$ $R^2 = 0,7531$ $\rho = 29324\ln(s) - 202027$ $R^2 = 0,9659$
	umedecimento	$\rho = 3041,7\ln(s) - 4763,1$ $R^2 = 0,8359$ $\rho = 18472\ln(s) - 98511$ $R^2 = 0,889$
Solo C	secagem	$\rho = 502,26\ln(s) - 804,08$ $R^2 = 0,3566$ $\rho = 89092\ln(s) - 823753$ $R^2 = 0,9424$
	umedecimento	$\rho = 1062,9\ln(s) - 3397,3$ $R^2 = 0,6091$ $\rho = 88148\ln(s) - 793714$ $R^2 = 0,9122$

Como forma de relacionam os valores obtidos de resistividade elétrica e as curvas de retenção de água no solo, foram substituídos os valores de teor de umidade na curva de retenção de água pelos valores de resistividade elétrica nos mesmos pontos. Substituíram-se inclusive os valores de w_s e w_r (umidades de saturação e residual) nas equações ajustadas de Van Genuchten, pelos valores de resistividade elétrica correspondente.

Assim é possível verificar nas **Figuras de 5.34 a 5.36** que mostram as curvas modificadas, é possível verificar que existe uma correlação, porém as curvas precisam de ajustes.

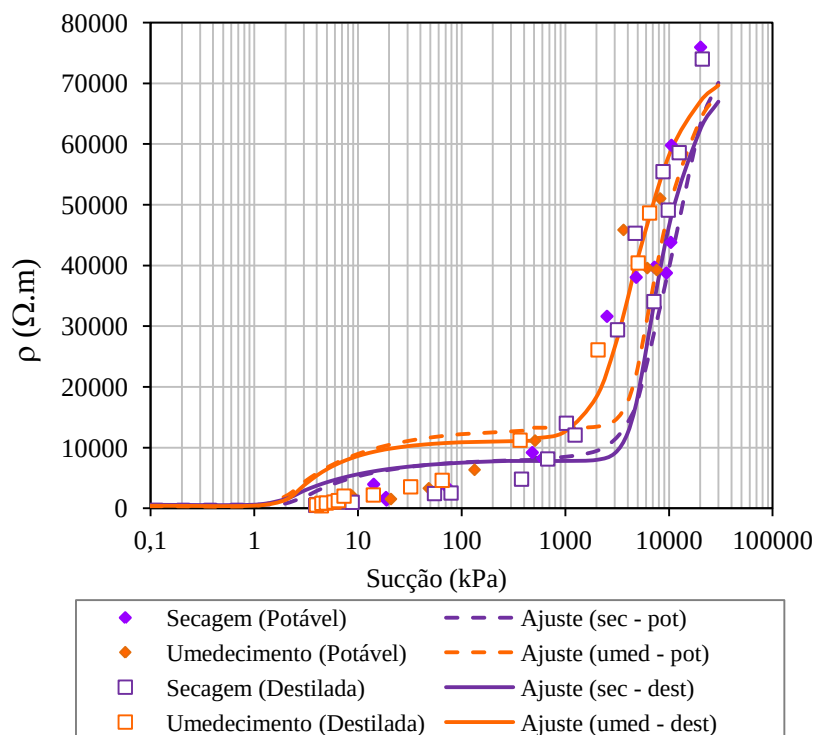


Figura 5.34 - Curva de Retenção modificada do Solo A Compactado.

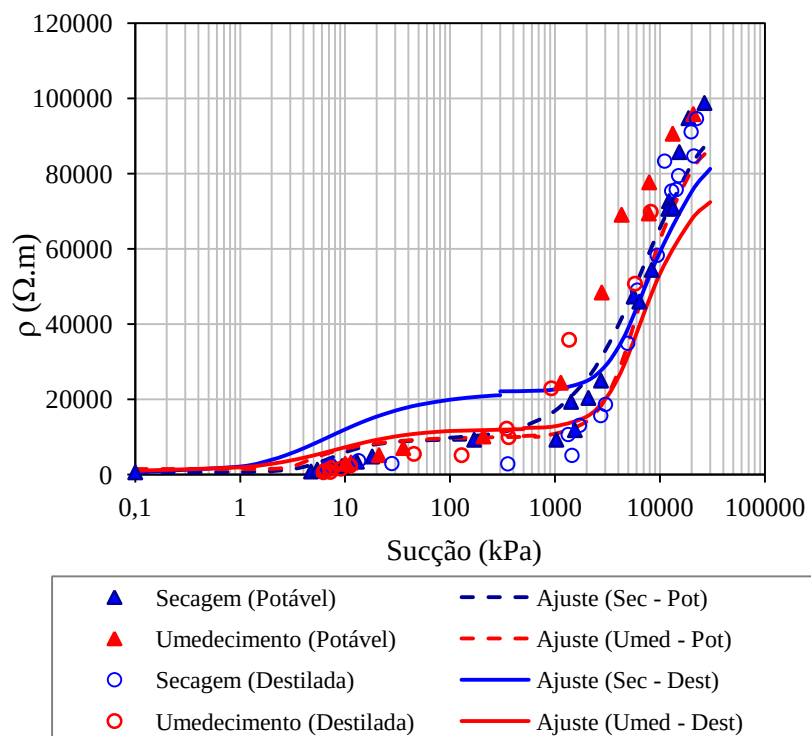


Figura 5.35 - Curva de Retenção modificada do Solo B Compactado.

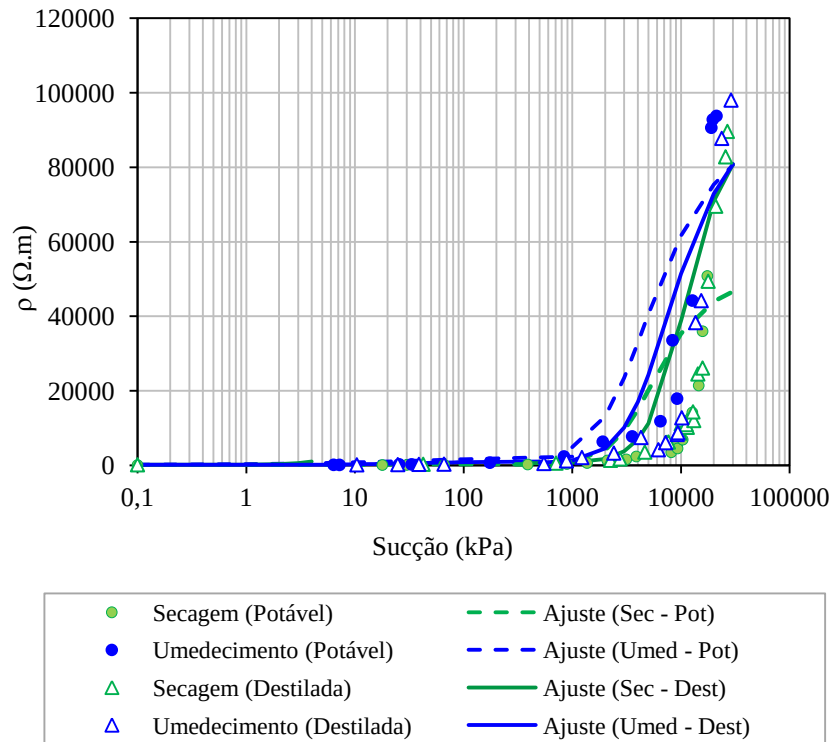


Figura 5.36 - Curva de Retenção modificada do Solo C Compactado.

5.6.2 Amostra Indeformada

A leitura da resistividade elétrica das amostras foi realizada durante o ensaio de curva de retenção como descrito anteriormente. Assim é possível relacionar a resistividade com os índices físicos das amostras obtidos através de correlações.

Resistividade versus teor de umidade:

Analisando os gráficos das **Figuras 5.37 e 5.38** verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica da amostra A indeformada, sofre uma mudança a partir do ponto de teor de umidade em torno de 5%, assim como a amostra compactada, porém de forma mais drástica. Essa diferença ocorre provavelmente devido a compactação realizada no ensaio anterior, modificando a estrutura original do solo, que foi mantida neste caso.

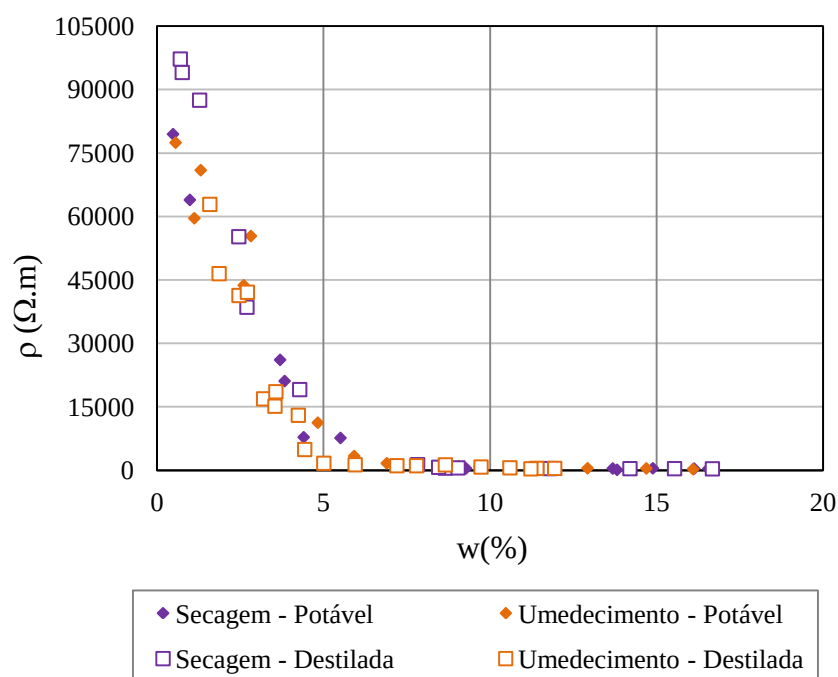


Figura 5.37 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade gravimétrico para o solo A, indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

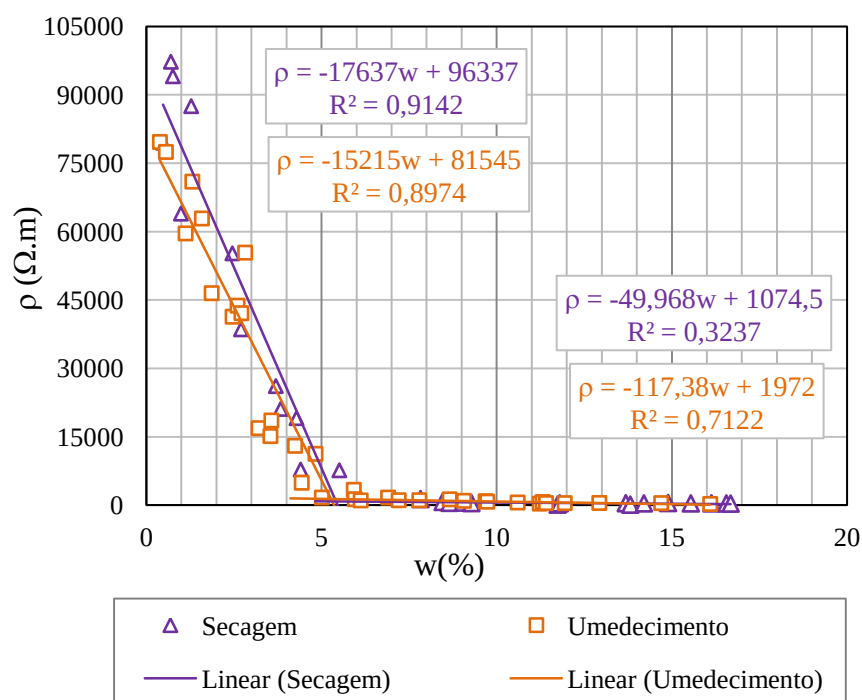


Figura 5.38 – Gráfico de Resistividade versus teor de umidade para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

É possível verificar que os ajustes para as amostras compactadas possuem coeficiente de determinação (R^2) acima de 90% e para as amostras indeformadas o coeficiente de determinação (R^2) acima de 80%, mostrando um bom ajuste utilizando curva exponencial.

Resistividade versus Grau de Saturação:

Na **Figura 5.39 e 5.40** são apresentadas as curvas de resistividade versus grau de saturação, onde as medidas foram obtidas durante os ensaios de sucção com a leitura de resistividade.

Pode-se observar que nas amostras compactadas a mudança ocorre quando o grau de Saturação varia em torno de 30% a 50%, já na amostra A indeformada essa mudança ocorre quando o grau de saturação está em torno de 25%. Sabendo que uma amostra indeformada de um solo apresenta porosidade e índice de vazios diferentes deste mesmo solo compactado, foram verificados os valores obtidos para estes índices.

Observando então, o solo A compactado, que possui o índice de vazios em torno de 0,37 e a porosidade de 27,2% e comparando com a amostra indeformada que neste caso apresentou o índice de vazios em torno de 0,65 e a porosidade de 39,3%, pode-se verificar que estes valores influem diretamente no grau de saturação da amostra.

Para uma mesma umidade gravimétrica (w) o grau de saturação varia de 40% para a amostra compactada e 25% para a amostra indeformada. Mostrando que o ponto de inflexão ocorre próximo a essa umidade em torno de 5% tanto para o solo indeformado quanto para o solo compactado, mas em graus de saturação diferentes.

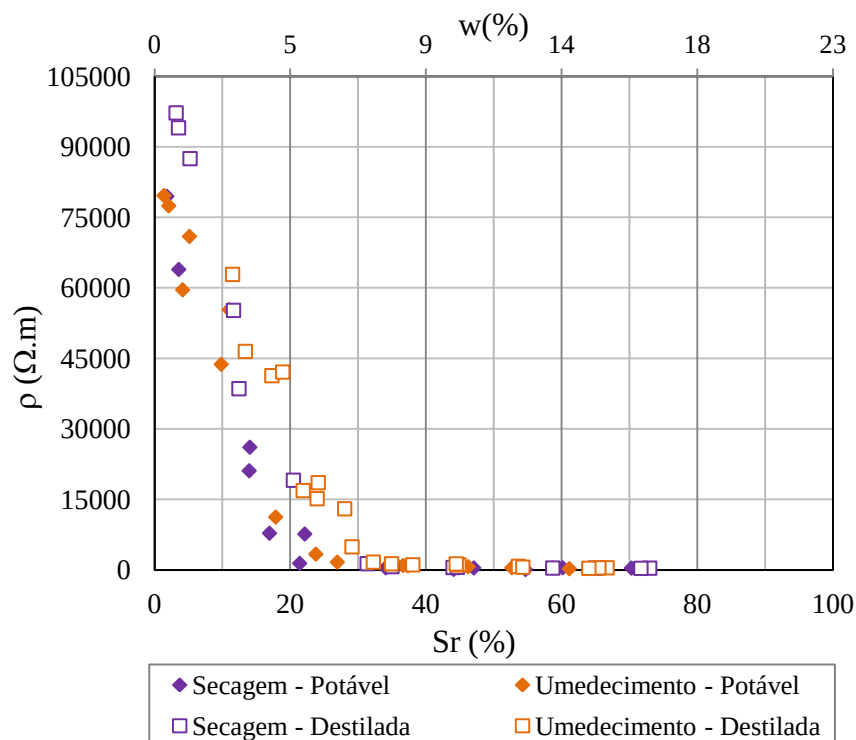


Figura 5.39 - Gráfico de Resistividade versus Grau de Saturação para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

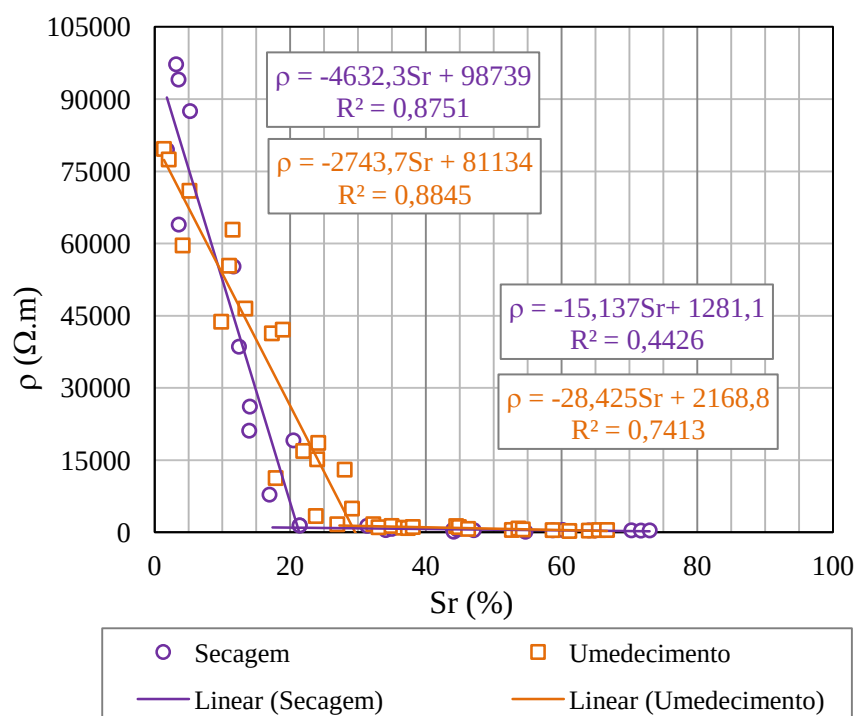


Figura 5.40– Gráfico de Resistividade Grau de Saturação para o solo A indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento, com as curvas de ajuste encontradas.

No primeiro trecho onde o grau de saturação está abaixo de 25%, ocorre a leitura de resistividades mais altas devido à presença de ar nos poros, e a descontinuidade da água presente nos canalículos. Já no trecho com grau de saturação acima de 25%, pode se observar a leitura de resistividades mais baixas e constantes.

Resistividade Elétrica em função da sucção do solo

Na **Figura 5.41** são apresentadas as curvas obtidas através dos ensaios de sucção com a leitura de resistividade.

Observa-se que o ponto de inflexão da curva esta próximo do valor de sucção de 2MPa, coincidindo, também com as pressões de sucção do ponto de segunda entrada de ar, observados nas curvas de retenção de água no solo, assim como as amostras compactadas. Nota-se que em comparação com a amostra A, a curva apresenta uma pequena diferença no valor de sucção, devido a compactação e diminuição dos vazios do solo.

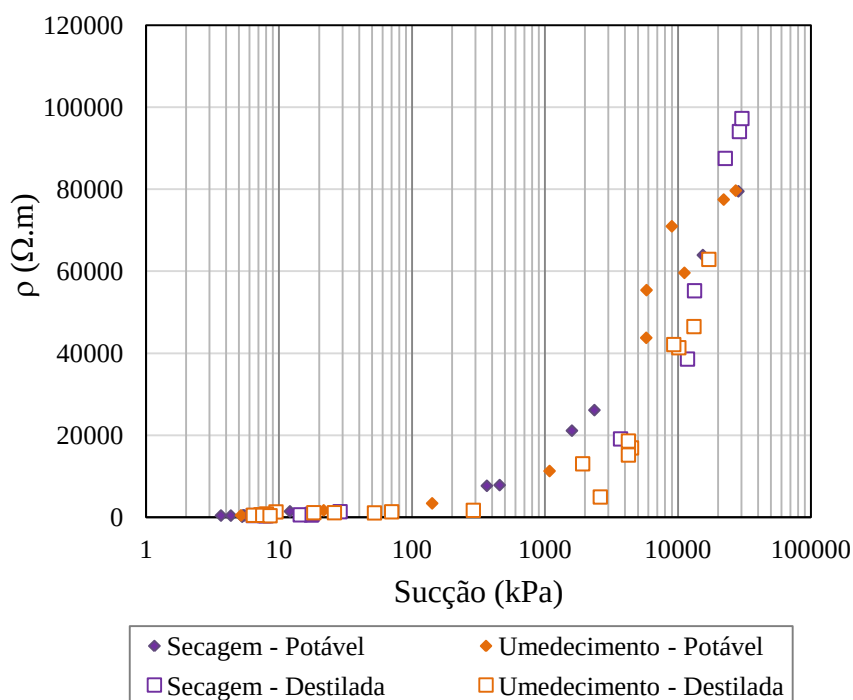


Figura 5.41- Gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A indeformado através da trajetória de secagem e umedecimento, utilizando água Potável e Destilada.

Análise da Resistividade

Analisando os gráficos das **Figuras 5.37 a 5.41** verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica do solo sofre uma mudança drástica a partir do ponto em que ocorre a descontinuidade da água presente nos vazios. 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 trecho da curva, ocorrendo o rompimento da continuidade da água dentro dos poros, a amostra apresenta-se mais seca com elevado nítido da medida da resistividade.

A **Figura 5.42** apresenta o ajuste obtido da mesma forma que os ajustes obtidos para os solos compactados.

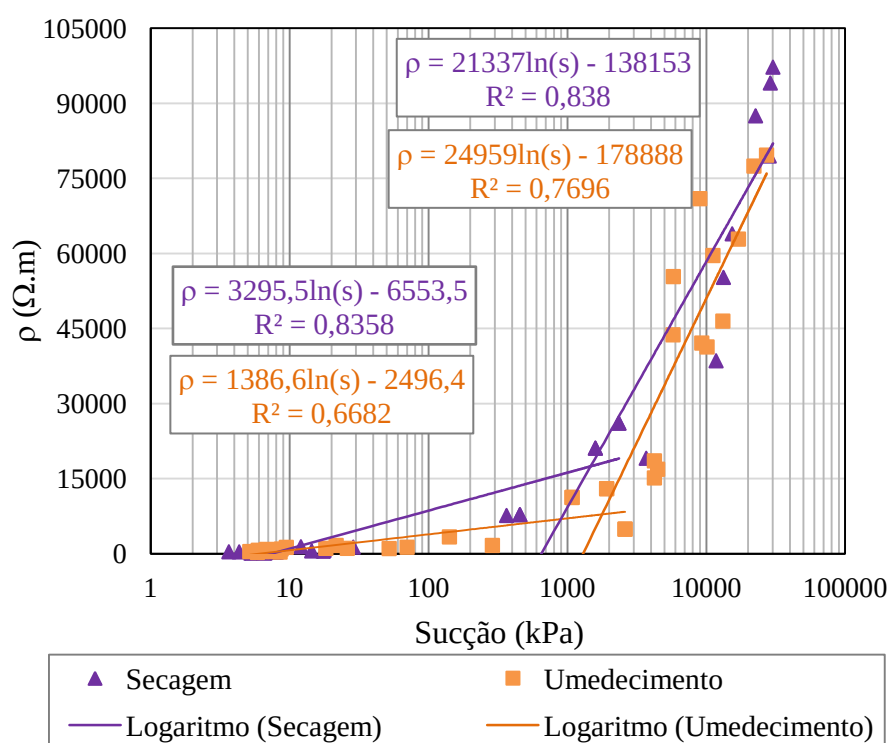


Figura 5.42 - Ajuste do gráfico de Resistividade versus Sucção para o solo A, indeformado, através da trajetória de secagem e umedecimento.

Assim como o que ocorre nos solos compactados, corroborando com Aquino (2010), que comenta que ao entrar ar nos microporos do solo, a tendência da sucção é manter-se 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.

A **Tabela 5.20** apresenta um resumo das equações obtidas para o solo A, tanto para a amostra indeformada quanto para a amostra compactada.

Tabela 5.20 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção – Solo A indeformado e compactado.

Solo A	Indeformada	secagem	$\rho = 3295,5\ln(s) - 6553,5$	$R^2 = 0,8358$
			$\rho = 21337\ln(s) - 138153$	$R^2 = 0,838$
		umedecimento	$\rho = 1386,6\ln(s) - 2496,4$	$R^2 = 0,6682$
			$\rho = 24959\ln(s) - 178888$	$R^2 = 0,7696$
	Compactada	secagem	$\rho = 1646,6\ln(s) - 2200,3$	$R^2 = 0,833$
			$\rho = 20547\ln(s) - 131848$	$R^2 = 0,9093$
		umedecimento	$\rho = 2128,9\ln(s) - 2895,9$	$R^2 = 0,9321$
			$\rho = 19614\ln(s) - 128149$	$R^2 = 0,7749$

Foi realizada a mesma análise com a amostra A indeformada, das curvas de retenção de água no solo com os valores obtidos para resistividade elétrica do solo ponto a ponto e como forma de relacionar os valores obtidos, foram substituídos os valores de teor de umidade na curva de retenção de água pelos valores de resistividade elétrica nos mesmos pontos, **Figura 5.43**.

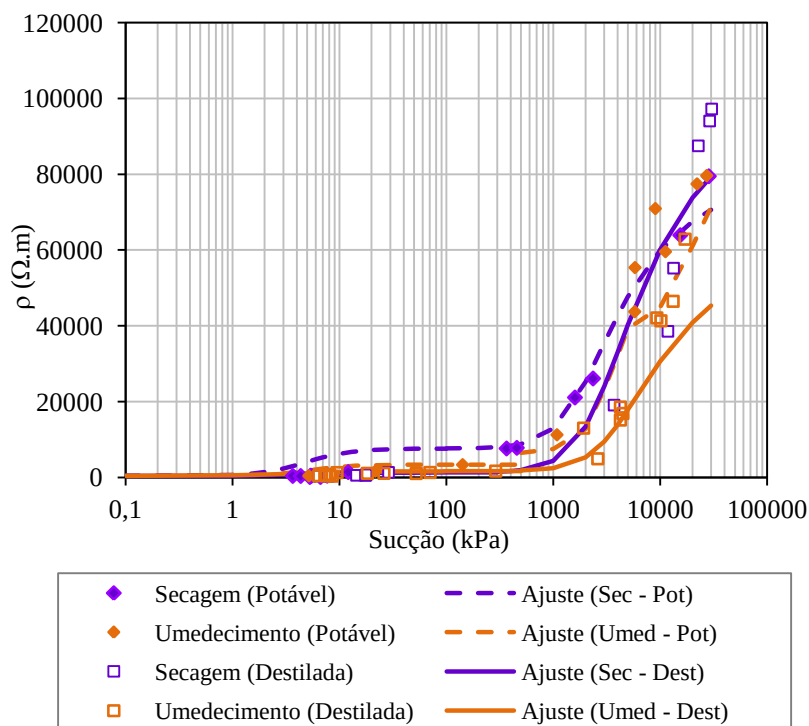


Figura 5.43 - Curva de Retenção modificada do Solo A Indeformado.

Verificando todos os gráficos obtidos, amostras compactadas e amostra indeformada, é possível verificar que existe correlação, mas que as curvas precisam de ajustes. As leituras de resistividade são afetadas pelo fator escala podendo ser um fator que influencia para os ajustes neste caso.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dividido de forma a relacionar as conclusões obtidas com os objetivos iniciais do trabalho, os itens **6.1** a **6.4** descrevem as conclusões obtidas. Ao final o item **6.5** traz sugestões e recomendações para continuidade do trabalho.

6.1 Curvas de retenção de água pelas trajetórias de secagem e umedecimento

Através do experimento foi possível observar que quanto menor o teor de umidade, menor é a histerese na sucção, isto é, menor a diferença entre as curvas de retenção de água no solo pela trajetória de secagem e umedecimento nos solos B e C.

As curvas obtidas, das amostras A e B, corroboram à curva típica de solos arenosos com baixa capacidade de retenção de água, apresentada por Fredlund e Xing (1994), **Figura 3.16**. Este tipo de curva apresenta uma zona de dessaturação quase vertical, sendo uma grande variação de umidade em um pequeno intervalo de variação de sucção. A partir dos gráficos apresentados nos resultados é possível observar duas pressões de entradas de ar bem definidas que podem ser relacionadas às pressões de entrada de ar nos macro e microporos, respectivamente.

Para o solo C, argiloso, as curvas obtidas assemelham-se à curva típica de solos argilosos, ou seja, possuem maior capacidade de retenção de água, corroborando Fredlund

e Xing (1994). Essa curva, devido a maior capacidade de retenção, apresenta uma grande variação de pressões de sucção em um pequeno intervalo de variação de umidade.

A compactação do solo A diminuiu seu índice de vazios, ou seja, diminuiu os poros, implicando numa diminuição da quantidade de água necessária para saturar o solo. Assim, as curvas apresentaram maiores diferenças no trecho inicial até o momento da primeira entrada de ar e a partir desse ponto, as curvas seguiram a mesma tendência.

Tanto nas curvas de retenção para o solo B quanto para as curvas do solo C, pôde-se verificar a existência de histerese entre elas. Por outro lado, para o solo A, tanto compactado, quanto indeformado, não foi possível notar histerese entre as curvas.

6.2 Influência do teor de umidade e grau de saturação na resistividade elétrica

Analisando os gráficos de resistividade em função do teor de umidade verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica das amostras arenosas (A e B), sofre uma mudança drástica a partir do ponto de teor de umidade em torno de 6%. Por outro lado, para a amostra argilosa (C), esse ponto de mudança está próximo do teor de umidade de 9%. Essa diferença deve-se, provavelmente, a diferença da composição granulométrica das amostras. Dessa maneira, se pode considerar que a relação entre a resistividade elétrica do solo e o teor de umidade pode ser dividida em dois trechos. No trecho onde as umidades estão abaixo do ponto de inflexão, observa-se uma grande variação dos valores de resistividade, onde ocorre a perda da continuidade dos caminhos de água no solo promovendo o aumento brusco nos valores de resistividade. Nos trechos com umidades acima do ponto de inflexão os valores obtidos para resistividade apresentam pouca variação e apresentam valores abaixo de $15.000\Omega.m$, onde tem-se a continuidade da água.

Na amostra indeformada ocorre uma mudança a partir do ponto de teor de umidade em torno de 5%, assim como a amostra compactada, porém de forma mais drástica. Essa diferença ocorre provavelmente devido a compactação que modifica a estrutura original do solo, que foi mantida neste caso.

Nos gráficos relacionando resistividade elétrica com grau de saturação é possível observar o comportamento descrito por Camapum de Carvalho(2010), descrito anteriormente.

Sendo assim, apesar do Solo B possuir uma porcentagem maior de argila em sua composição granulométrica, ele possui uma menor porcentagem de argila não agregada do que o Solo A e, portanto, apresenta um comportamento mais próximo de areias, com o Grau de saturação do ponto de inflexão maior do que as outras amostras (A e C), em torno de 50%. O Solo A apresenta o ponto de inflexão com o grau de saturação em torno de 40%. Já na amostra C, o grau de saturação para o ponto de inflexão é ainda mais baixo do que nas outras amostras, em torno de 25%, comportamento que pode estar relacionado a quantidade de argila não agregada da amostra.

Apesar do comportamento verificado com o grau de saturação, quando se analisou a resistividade em função do teor de umidade, ele não ficou evidente.

Comparando os resultados obtidos para o solo A compactado e para o mesmo solo indeformado, é possível verificar a influência de outros fatores nesta leitura.

Observando então, o solo A compactado, que possui o índice de vazios em torno de 0,37 e a porosidade de 27,2% e comparando com a amostra indeformada que neste caso apresentou o índice de vazios em torno de 0,65 e a porosidade de 39,3%, pode-se verificar que estes valores influem diretamente no grau de saturação da amostra.

Portanto, sabendo que o ponto de inflexão nos gráficos de Resistividade versus sucção ocorre próximo de 6%, para o solo A, tanto compactado quanto indeformado.

Assim, para uma mesma umidade gravimétrica (w) o grau de saturação é de 40% para a amostra compactada e 25% para a amostra indeformada devido à compactação realizada que diminui a porosidade do solo.

6.3 Análises dos resultados de resistividade elétrica e sucção matricial

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

Verificou-se que o comportamento da resistividade elétrica do solo sofre uma mudança drástica a partir do ponto em que ocorre a descontinuidade da água presente nos poros, próximo aos valores da segunda entrada de ar, 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, onde se obteve uma função logarítmica com pequena inclinação, representa a amostra mais úmida, com a medida de resistividade praticamente constante e sucção baixa, onde se tem a continuidade da água nos poros. E o segundo, ocorrendo descontinuidade da água dentro dos poros, a amostra apresenta-se mais seca com um aumento considerável nos valores de resistividade, corroborando, Muñoz-Castelblanco (2011).

Portanto, a dessaturação dos macroporos do solo promove o aumento da resistividade elétrica e a partir do ponto onde ocorre o início da dessaturação dos microporos esse aumento torna-se substancial, devido à dificuldade condução.

Sabendo-se que a condutividade elétrica do solo depende da quantidade de água presente nos poros e que a interação da água com as partículas de solo influencia diretamente as leituras de resistividade. Os solos A e B se comportam de forma muito semelhante, com uma pequena diferença no ponto de inflexão que ocorre para a curva do solo B na sucção igual a 2 MPa, mais elevada do que para o solo A, de 1 MPa. O que pode

ser influencia do teor de argila nas amostras, que no momento em que se encontram saturadas apresentam o comportamento de argila mesmo estando agregadas a partículas maiores. Enquanto o solo C apresenta uma sucção de 6 MPa no ponto de inflexão.

Nos gráficos de Resistividade versus Sucção é possível notar que a histerese não é tão aparente. O solo A não apresenta histerese e essa característica se mantém nos gráficos de Resistividade versus Sucção.

A condutividade/resistividade elétrica é um parâmetro que, apesar de sofrer a interferência de vários fatores no solo como teor de umidade, grau de saturação, índice de vazios e temperatura, apresenta uma boa correlação com a sucção.

Ao final das análises foram obtidas as curvas que relacionam diretamente Resistividade elétrica e Sucção, apresentadas na **Tabela 6.1**.

Tabela 6.1 - Resumo das equações obtidas para Resistividade elétrica em função da Sucção.

Solo A Compactado	secagem	$\rho = 1646,6\ln(s) - 2200,3$ $R^2 = 0,833$ $\rho = 20547\ln(s) - 131848$ $R^2 = 0,9093$
	umedecimento	$\rho = 2128,9\ln(s) - 2895,9$ $R^2 = 0,9321$ $\rho = 19614\ln(s) - 128149$ $R^2 = 0,7749$
Solo A Indeformado	secagem	$\rho = 3295,5\ln(s) - 6553,5$ $R^2 = 0,8358$ $\rho = 21337\ln(s) - 138153$ $R^2 = 0,838$
	umedecimento	$\rho = 1386,6\ln(s) - 2496,4$ $R^2 = 0,6682$ $\rho = 24959\ln(s) - 178888$ $R^2 = 0,7696$
Solo B	secagem	$\rho = 1551,8\ln(s) + 535,91$ $R^2 = 0,7531$ $\rho = 29324\ln(s) - 202027$ $R^2 = 0,9659$
	umedecimento	$\rho = 3041,7\ln(s) - 4763,1$ $R^2 = 0,8359$ $\rho = 18472\ln(s) - 98511$ $R^2 = 0,889$
Solo C	secagem	$\rho = 502,26\ln(s) - 804,08$ $R^2 = 0,3566$ $\rho = 89092\ln(s) - 823753$ $R^2 = 0,9424$
	umedecimento	$\rho = 1062,9\ln(s) - 3397,3$ $R^2 = 0,6091$ $\rho = 88148\ln(s) - 793714$ $R^2 = 0,9122$

6.4 Conclusão

As análises dos resultados obtidos com os três solos mostraram que, a partir da curva de retenção realizada segundo a metodologia aqui proposta, ou seja, com a leitura simultânea de resistividade é possível fazer um monitoramento da sucção em campo.

A quantidade de água disponível é tradicionalmente definida pela diferença entre a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (REICHARDT, 1990). A capacidade de campo é o limite superior de disponibilidade de água no solo, equivalente ao equilíbrio entre a força gravitacional (percolação de água) e a força de retenção desta água pelo solo, ou seja, é o teor máximo de água que o solo pode reter contra a força da gravidade, sendo avaliado nos potenciais de -10 kPa para solos arenosos ou -33 kPa para solos argilosos. A quantidade de água no solo onde as plantas não conseguem mais extrair água e atinge um murchamento irrecuperável, é conhecida como o ponto de murcha permanente e é avaliado no potencial de -1500 kPa (WINTER, 1984).

Observando as curvas de retenção de água podem-se determinar alguns trechos importantes; o primeiro trecho, entre a primeira entrada de ar e o primeiro ponto de umidade residual, que no campo corresponde ao trecho onde a água que infiltra é rapidamente drenada; O segundo trecho corresponde ao patamar que inicia no ponto da primeira umidade residual, chamada de capacidade do solo, e vai até a segunda entrada de ar, que corresponde ao ponto de murcha, esse trecho corresponde à água disponível.

Sendo que, a faixa de água de interesse no solo corresponde ao intervalo compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, convencionalmente denominado de água disponível. (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

No campo a quantidade de água presente no solo e a sucção variam entre o ponto da primeira entrada de ar, correspondente ao ponto de infiltração de água no solo, e a segunda entrada de ar, correspondente ao ponto de murcha permanente. Sabendo que o ponto de

segunda entrada de ar corresponde ao ponto de inflexão nas curvas que relacionam Resistividade elétrica, então no campo teremos valores correspondentes apenas ao primeiro trecho dos ajustes.

6.5 Recomendações / Sugestões

Os resultados obtidos através dos ensaios e análises mostraram ótimas correlações, principalmente entre a Resistividade elétrica e a Sucção, pois as duas dependem diretamente do teor de umidade do solo. Assim, a tentativa de utilizar a curva de retenção obtida substituindo os valores de umidade pelos valores de resistividade, mostrou uma tendência interessante principalmente para o uso em campo.

Porém para possibilitar a utilização sugere-se que seja feito estudos de laboratório no sentido de se obter a dimensão do corpo de prova para garantir a concordância com os valores a serem obtidos em campo. E a utilização de amostras indeformadas, para que os ensaios em placa repliquem de maneira aproximada os resultados da leitura de resistividade no piezocone.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-HASSANEIN, Z. S., BENSON, C. H., BLOTZ, L. R. – **Electrical Resistivity of Compacted Clays**. Journal of Geotechnical Engineering, 122(5): 397- 406, 1996. (DOI 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:5(397)).
- AQUINO, F. R. - **Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado**. Brasília, DF. Tese de mestrado. Unb, 2010.
- ARCHIE, G. E. **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. Transactions of the American Institute of Mining, v. 146, p. 54-62, 1942.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Método de Ensaio**. NBR 6459/84. [S.l.]: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio**. NBR 7180/84. [S.l.]: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - Determinação da Massa Específica dos Sólidos. Método de Ensaio**. NBR 6508/84. [S.l.]: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solos – Análise Granulométrica. Método de Ensaio**. NBR 7181/84. [S.l.]: ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. NBR 6457. [S.l.]: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio**. NBR 7182/86. [S.l.]: ABNT, 1986.

- BECK, Y.-L. *et al.* **Microstructural Interpretation of Water Content and Dry Density Influence on the DC-Electrical Resistivity of a Fine-Grained Soil.** Geotechnical Testing Journal, v. 34, n. 6, nov. 2011.
- BICALHO, K. V., *et al.* **Single-Function Approach to Calibrating Whatman No. 42 Filter Paper Based on Suction Versus Water Content Relationships Filter Paper Method of Soil Suction Measurement.** Geotechnical Testing Journal, v. 38, n. 1, nov. 2014.
- BOSZCZOWSKI, R. R.; SILVA, J. M. **Avaliação de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de um Perfil de Alteração de Granito-Gnaiss de Curitiba-PR.** Rio de Janeiro, RJ. Tese (doutorado). PUC-Rio, 2008.
- BOSZCZOWSKI, R. R.; SILVA, J. M. **Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade.** In: COBRAMSEG 2008. Buzios (RJ), 2008.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Gestão de riscos em encostas: implicações geotécnicas da ocupação e uso do solo e sua relação com a educação ambiental, com as limitações das normas técnicas e com a falta de efetividade das normas administrativas e jurídicas.** In Workshop: Desastres Naturais, COBRAMSEG, Anais. Gramado, RS. P329-334. 2010
- CAMPANELLA, D. R. G., *et al.* **Site Characterization of Soils Deposits Using Advances in Piezocone Technology.** Proceedings of the 1st Conference on Geotechnical Site Characterization. Georgia/USA: [s.n.]. p. 995-1000, 1998.
- CAMPANELLA, R.G., WEEMEES, I.A. **Development and Use of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies,** 42th Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, pp. 1-11, 1989.
- CAMPOS, L.G., RODRIGUES, R.A, PEIXOTO, A.S.P, YAMASAKI, M.T. **Estudo da relação entre resistividade elétrica e sucção para um solo tropical arenoso compactado.** XVI COBRAMSEG, setembro 2012, no Summerville Resort - Porto de Galinhas – PE, 2012.
- CPRM. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo.** Programa de Geologia do Brasil, Setembro de 2006.
- CUSTÓDIO, G. S. *et al.* **Estudo de fatores que influenciam a curva característica de retenção de água no solo.** 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 25 a 27/08/2004 – São Carlos/SP, 2004.

- DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 3rd edition, PWS Publishing Company, Boston, 1994.
- DELAGE, P. **Experimental unsaturated soil mechanics. Keynote address**, In 3rd . International Conference on Unsaturated Soils. Recife, vol. 3.2002
- DE VITA, P.; DI MAIO, R.; PIEGARI, E.; **A study of the correlation between electrical resistivity and matric suction for unsaturated ash-fall pyroclastic soils in the Campania region (southern Italy)**. Environ Earth Sci (2012) 67:787–798 (DOI 10.1007/s12665-012-1531-4)
- DEXTER, A.R. & RICHARD, G. **Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions**. Soil Till. Res., 103:113-118, 2009.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley e Sons, INC, 517p, 1993.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v.31, n.3, p.521-532, 1994.
- GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. 108p. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. New York. Academic Press, p.5-127, 1971.
- 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.
- KALINSKI, R.; KELLY, W. **Estimating water content of soils from electrical resistivity**. GTJ. ASTM, 16(3), 323-329. 1993.
- 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.
- LONG, M.; *et al* **Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays**. Canadian Geotechnical Journal, Volume 49, Number 10. (doi:10.1139/T2012-080). 2012.
- LUNNE, T. ROBERTSON, P.K. & POWELL, J. **Cone Penetration Test in Geotechnical Practice**, Blackie Academic & Professional, London, 311 pp. 1997.

- MARINHO, F. & OLIVEIRA, O. **“The Filter Paper Method Revisited”**, Geotechnical Testing Journal, vol.29 (3), pp. 250-258. 2006.
- MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- MIGUEL, M. G. ; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. **Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR**, Revista de Ciência & Tecnologia, Vol. 12, nº 24, pp. 63-74. 2006.
- MIRANDA, J.M; LUIS, J. F.; COSTA, P. T.; SANTOS, F. M. **Fundamentos de Geofísica**. Cap. 5 - Geoeletricidade, pág.120 a 134. 1997.
- MOLIN J.P.; RABELLO L.M. **Estudos Sobre a Mensuração da Condutividade Elétrica do Solo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.1, p.90-101. 2011.
- MUÑOZ-CASTELBLANCO, J. A.; PEREIRA, J. M.; DELAGE, P.; CUI, Y. J. **“The Influence of Changes in Water Content on the Electrical Resistivity of a Natural Unsaturated Loess”**. Geotechnical Testing Journal, Vol.35. 2011.
- OH, M.H.; KIM, Y.S.; PARK, J.B.; KWON, O.S. **Laboratory Study on Applicability of Resistivity cone for investigation of subsurface contamination**. The 3rd International Conference on Site Characterization, ISC'3. Taipei, Taiwan.: Taylor & Francis Group Ed. 2008. p. 737-743.
- OLIVEIRA, F.S. **Estudo Experimental de uma Área Contaminada por Lodo Biossólido no DF Via de Ensaio Cone Resistivo**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-122/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.
- PACHECO, A.O. **Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados**. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 151 p. 2004.
- PAZ, E. C. ; CAMPELO N. S. **Avaliação comparativa de Métodos Laboratoriais de Medição de Resistividade Elétrica do Solo: Uma Abordagem Teórica**. Solos e Rochas, Revista Latino-americana de Geotecnia v. 28 n. 2, p.223 – 228, 2005.
- PEIXOTO, A. S. P. *et al.* **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: [s.n.]. 2010.

- PEIXOTO, A. S. P.; YAMASAKI, M. T.; LODI, P. C. **Evaluation of Electrical Resistivity in a Tropical Sandy Soil Compacted.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 19C, p. 629-644, 2014.
- PEJON, O. J. **Mapeamento Geotécnico da Folha de Piracicaba-SP (Escala1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação dos Atributos.** EESC - USP. São Carlos/SP, p. 213 p. 1992.
- PEREZ, N.; GARNICA, P.; LANDAVERDE, N. **Measurement of soil suction using soil's resistivity.** ICSMGE 2009 - 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt ([DOI 10.3233/978-1-60750-031-5-245](https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-245)). 2009.
- PIEGARI E.; DI MAIO, R. **Estimating soil suction from electrical resistivity.** Natural Hazards and Earth System Sciences. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2369/2013/ ([DOI:10.5194/nhess-13-2369-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-2369-2013)), 2013.
- POZDNYAKOV, A. I., POZDNYAKOVA, L. A., & KARPACHEVSKII, L. O. **Relationship between Water Tension and Electrical Resistivity in Soils.** Eurasian Soil Science , S78–S83, 2006.
- RAZALI, F. B. M. N.; OSMAN, A. B. S. S. B. **Non-quantitative correlation of soil resistivity whit some soil parameters.** National Posgraduate Conference (NPC), Kuala Lumpur, p. 1-4, Setembro 2011.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2. ed. Piracicaba: USP-ESALQ, 1996. 505 p.
- RIDLEY, A. M.; WRAY, W. K. **Suction measurement: A review of current theory and practices.** 1st Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris, 1995.
- RODRIGUES, R. A. **Modelação das Deformações por Colapso devidas à ascensão de Lençol Freático.** Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos/SP. 2007.
- RØMOEN, M.; PFAFFHUBER, A. A.; KARLSRUD, K. AND HELLE, T.E. **Resistivity on marine sediments retrieved from RCPTU soundings: a Norwegian case study.** In: 2nd Symposium on Cone Penetration Test, CPT'10, 8p. Huntington Beach, CA, USA. 2010.
- SHIHADA, H. *et al.* **Estimating Moisture Content of Landfilled Municipal Solid Waste without Drilling: Innovative Approach.** Journal of hazardous, toxic, and

- radioactive waste, ASCE .v17 .p317-330.(DOI: [10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000155](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000155).) 2013
- SOTO, M. A. **Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos Não Saturados**. Tese de Doutorado, Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP – São Paulo, 2004.
- SOTO, M. A. A.; KUMAYAMA, D.M.; CHANG, H. K. **Calibração de um reflectômetro para estudos do fluxo de água em solo não saturado**. Tese de Doutorado, Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP – São Paulo, 2007.
- VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VILAR, O. M. **Solos não saturados**. **Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- WEEMES, I. A. **Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies**. Vancouver, CA., p. 86. 1990.
- WINTER, E. J. **Water, Soil and the plat**. The Macmillan Press, London, 170 p, 1974.
- YAMASAKI, M. T. ; PEIXOTO, A. S. P. ; PREGNOLATO, M. C. **Avaliação da Resistividade Elétrica Variando-se o Teor de Salinidade do Fluido de Percolação**. In: COBRAMSEG 2012, 2012, Porto de Galinhas, Ipojuca, PE. COBRAMSEG 2012. v. 1. p. 1-7
- YAMASAKI, M. T.; PEIXOTO, A. S. P.; ULSON, J. A. C. **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: [s.n.]. 2010.
- YAMASAKI, M.T. **Influência da salinidade do fluido na avaliação da compactação e da resistividade elétrica de dois solos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unesp/Bauru, São Paulo, 141 p, 2012.
- YAMASAKI, M. T.; PEIXOTO, A. S. P.; LODI, P. S.; **Evaluation of Electrical Resistivity in a Tropical Sandy Soil Compacted**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 19/C [2014].