

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A RESISTIVIDADE
ELÉTRICA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE
UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO

FERNANDO RODRIGO DE AQUINO

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc
CO - ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-189/10

BRASÍLIA / DF: SETEMBRO / 2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A RESISTIVIDADE
ELÉTRICA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE UM
SOLO ARGILOSO COMPACTADO**

FERNANDO RODRIGO DE AQUINO

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

APROVADA POR:

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANNA SILVIA P. PEIXOTO, DSc (UNESP - Bauru)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 de SETEMBRO de 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA

AQUINO, FERNANDO RODRIGO DE

Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado [Distrito Federal] 2010

xviii, 117 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2010)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Estudo Comparativo.

2. Resistividade Elétrica.

3. Características Geotécnicas.

4. Solo Compactado.

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fernando Rodrigo de Aquino

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Comparativo entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Fernando Rodrigo de Aquino

SHIN CA 09 Lt.13/15 apt. 315 Ed. Porto do Lago, Lago Norte

CEP: 71503-509 - Brasília/DF - Brasil

eng.aquinofr@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Lourivan e Lourdes, pelo exemplo de vida, pelo apoio de sempre, pela
confiança em mim.*

*A minha esposa Larissa, por ser sempre o grande motivo da minha felicidade, simplesmente
minha maior fonte de motivação e apoio em toda minha jornada, e pelas incontáveis horas
trabalhando ao meu lado neste projeto.*

*Se eu pudesse os fazer eternos ... eternos eu os faria. A vocês, não mais que com
justiça dedico essa vitória.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor da vida, que me fez capaz de realizar esse trabalho;

Aos meus queridos pais que com todo amor, carinho e apoio incondicionais me auxiliaram em mais esta conquista. Amo vocês!

Aos professores Newton Moreira de Souza e Márcio Muniz de Farias pelo apoio, pela orientação, pela atenção, pela disposição de ajudar sempre.

Ao eterno mestre e grande amigo Renato Cabral Guimaraes por todos os momentos de companheirismo e ajuda e principalmente por despertar em mim o gosto por estudar Geotecnia.

Ao engenheiro Carlos Rogério Santana pela imensa ajuda no início desta pesquisa.

Ao Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU (LER) que permitiu a realização deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB, pelos ensaios realizados neste trabalho, em especial ao grande amigo Ricardo.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos amigos companheiros de geotecnia em especial a Lorena, João Paulo e Iván por todos os momentos de companheirismo, de auxílio e principalmente pela nossa amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia UnB, pelo enorme prazer de tê-los conhecido e aprendido durante o mestrado, em especial ao professor José Camapum de Carvalho.

A minha família e a todas as pessoas que sempre me incentivaram, que acreditaram no meu potencial, deram força nos momentos difíceis e que estão sempre comigo no meu pensamento e em minhas orações.

E por fim, mas não menos importante, agradeço muito a minha esposa Larissa por todo incentivo e compressão, principalmente nesses últimos meses. Obrigado pelas palavras de estímulo e por entender meu mau humor e se manter sempre ao meu lado. Tenha certeza que você foi fundamental não só para a realização deste trabalho, mas também para que eu conseguisse percorrer toda a caminhada durante o mestrado. Obrigado por tudo e saiba que sempre AMAREI VOCÊ!

Muito obrigado!

Fernando Rodrigo de Aquino

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO

RESUMO

Nos últimos anos tem crescido muito o interesse pelo estudo de novas técnicas de controle e avaliação de maciços compactados. Da mesma forma, vem crescendo, também, o estudo de técnicas modernas de investigação geofísicas que possibilitem medições de propriedades do solo de maneira indireta. Nestes estudos, em geral, propriedades específicas do solo são medidas e sobre o resultado é feita uma interpretação, objetivando chegar a conclusões sobre o estado do maciço analisado. A medida de resistividade elétrica do solo surge como um bom exemplo de medição indireta. O objetivo desta técnica é perceber características do perfil geotécnico, medindo-se a resistividade elétrica do meio, o que a torna como uma alternativa em potencial para a obtenção de características físicas dos solos em um processo de controle de compactação. Dentro deste contexto, o presente trabalho realiza um estudo inicial e busca avaliar, em laboratório, o comportamento da resistividade elétrica de um solo argiloso compactado característico do Distrito Federal frente às variações de suas características físicas. Verificou-se, de modo geral, que as relações entre resistividade elétrica e os teores de umidade gravimétrica e volumétrica são boas e sua utilização se mostra, em um primeiro momento, como boa alternativa em um processo de controle de compactação, destacando-se, porém, a necessidade de se avaliar melhor a sensibilidade do método.

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE UM SOLO ARGILOSO COMPACTADO

ABSTRACT

In recent years it has grown the interest for the study of new techniques of control and evaluation of compacted fills. Likewise, it's also growing, the study of modern techniques of geophysical research to enable measurements of soil properties in an indirect way. In these studies, in general, specific soil properties are measured and the result is an interpretation made, aiming to reach conclusions about the state of mass analyzed. The measurement of electrical resistivity of the soil appears as a good example of indirect measurement. The objective of this technique is to understand the characteristics of the geotechnical profile, measuring the electrical resistivity of the environment, making it as a potential alternative for obtaining physical characteristics of the soil in a process of compacting control. Within this context, the present study conducts an initial study and seeks to assess in the laboratory, the behavior of the electrical resistivity of a compacted clayey soil characteristic from the Federal District, in the changing of his physical characteristics. It was verified, in general, that the relationship between electrical resistivity and gravimetric moisture content and volumetric moisture content are good and their use is shown, in a first moment, as a good alternative in a process of compacting control, being distinguished, however, the need to better assess the sensitivity of the method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelo de comportamento de condutores ôhmicos e não-ôhmicos.	5
Figura 2.2 Aparato de medida de resistividade elétrica em laboratório (KALINSKY E KELLY, 1994).	7
Figura 2.3 Aparato de medida de resistividade elétrica em laboratório (ABU-HASSANEIN E BENSON, 1994).....	8
Figura 2.4 Equipamento para medida da resistividade elétrica em laboratório em amostras compactadas (DANIEL, 1997): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado....	10
Figura 2.5 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (NACCI <i>et al.</i> , 2003): a) aparato de medida montado, b) célula cúbica acrílica.....	10
Figura 2.6 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (PACHECO, 2004).....	11
Figura 2.7 Aparato utilizado para medidas de resistividade em laboratório (MONDELLI <i>et al.</i> , 2008).....	11
Figura 2.8 Equipamentos utilizados para medidas de resistividade em laboratório (PEIXOTO <i>et al.</i> , 2010 e YAMASAKI <i>et al.</i> , 2010): a) placas de cobre, b) dispositivo de medida de resistividade elétrica semelhante ao piezocone de resistividade.....	12
Figura 2.9 Configuração do ensaio realizado com as placas de cobre (PEIXOTO <i>et al.</i> , 2010 e YAMASAKI <i>et al.</i> , 2010): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado.....	12
Figura 3.1 Coleta da amostra em campo: a) perfil do solo coletado, b) coleta do solo.	22
Figura 3.2 Aspecto visual da amostra - solo Noroeste.	22
Figura 3.3 Lavagem do material nas peneiras: a) peneiramento grosso, b) peneiramento fino.	25
Figura 3.4 Compactação dos corpos de prova: a) compactador mecânico, b) corpo de prova compactado.	28
Figura 3.5 Amostras preparadas em repouso.....	28
Figura 3.6 Malha de pontos a ser obtida nos ensaios de compactação.....	29
Figura 3.7 Medida de condutividade elétrica da água: a) equipamento, b) medida.....	31
Figura 3.8 Arranjo experimental para o método de duas pontas (GIROTO E SANTOS, 2002 – modificado).....	32
Figura 3.9 Equipamentos utilizados para medida de resistividade elétrica.	32
Figura 3.10 Gel condutor: a) embalagem, b) aplicação no capacete metálico.	33

Figura 3.11 Desenho esquemático da preparação do corpo de prova para a medida de resistividade elétrica.	33
Figura 3.12 Sistema para medidas da resistividade elétrica: a) desenho esquemático da montagem, b) imagem da realização das medidas.	34
Figura 3.13 Esquema de divisão do corpo de prova de 6".	35
Figura 3.14 Moldagem dos corpos de prova para secagem e umedecimento: a) cravação do cilindro de PVC, b) desmoldagem dos corpos de prova do cilindro de PVC.	36
Figura 3.15 Preparação dos corpos de prova para ensaio de papel filtro: a) secagem ao ar, b) umedecimento por gotejamento.	37
Figura 3.16 Montagem do ensaio com papel filtro: a) colocação do papel filtro, b) fechamento com filme plástico, c) colocação dos corpos de prova na caixa de térmica.	37
Figura 3.17 Medidas de resistividade elétrica: a) aferição das medidas com paquímetro, b) execução do ensaio, c) detalhe do corpo de prova.	39
Figura 3.18 Aparato triaxial cíclico – Laboratório de Engenharia Rodoviária – CEFTRU.	41
Figura 3.19 Preparação dos corpos de prova para ensaio triaxial cíclico: a) retirada da amostra do corpo de prova de 6", b) torno.	42
Figura 3.20 Preparação dos corpos de prova para ensaio triaxial cíclico: a) aferição de dimensões, b) medida de resistividade elétrica.	42
Figura 3.21 Ensaio de mini-CBR: a) cravação do cilindro metálico, b) penetração do pistão.	43
Figura 3.22 Ensaio de compressão simples com medida de resistividade elétrica: a) corpo de prova durante o ensaio, b) equipamento completo.	43
Figura 4.1 Curvas granulométricas - solo Noroeste com secagem prévia.	46
Figura 4.2 Curvas granulométricas - solo Noroeste sem secagem prévia.	47
Figura 4.3 Curvas granulométricas - solo Noroeste sem defloculante.	48
Figura 4.4 Carta de plasticidade.	49
Figura 4.5 Carta de classificação utilizada pelo método tradicional da metodologia MCT.	52
Figura 4.6 Carta de classificação utilizada pelo método das pastilhas.	53
Figura 4.7 Difratoograma do solo Noroeste.	54
Figura 4.8 Curvas de compactação – energias Proctor normal, intermediária e modificada.	56
Figura 4.9 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 1N, b) CP 2N, c) CP 3N, d) CP 4N, e) CP 5N, f) CP 6N, g) CP 7N.	59
Figura 4.10 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.	60

Figura 4.11 Relação $ddp / corrente$ – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 1M, b) CP 2M, c) CP 3M, d) CP 4M, e) CP 5M, f) CP 6M.	61
Figura 4.12 Teor de umidade gravimétrica x resistividade elétrica.	64
Figura 4.13 Teor de umidade volumétrica x resistividade elétrica.	64
Figura 4.14 Grau de saturação x resistividade elétrica.	65
Figura 4.15 Peso específico aparente seco x resistividade elétrica.	66
Figura 4.16 Índice de vazios x resistividade elétrica.	66
Figura 4.17 Índice de vazios x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo grau de saturação.	67
Figura 4.18 Umidade gravimétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo grau de saturação.	68
Figura 4.19 Grau de saturação x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.	69
Figura 4.20 Superfície: resistividade elétrica x grau de saturação x índice de vazios.	70
Figura 4.21 Umidade gravimétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.	71
Figura 4.22 Umidade volumétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.	71
Figura 4.23 Superfície: resistividade elétrica x umidade gravimétrica x peso específico aparente seco.	72
Figura 4.24 Superfície: resistividade elétrica x umidade volumétrica x peso específico aparente seco.	72
Figura 4.25 Relação entre a condutividade elétrica e salinidade para as águas estudadas.	75
Figura 4.26 Comparação entre a variação da resistividade elétrica do corpo de prova e da água frente a variação da salinidade da água.	77
Figura 4.27 Teor de umidade volumétrica x condutividade elétrica.	78
Figura 4.28 Relação entre a resistividade elétrica do corpo de prova e a resistividade elétrica da água.	79
Figura 4.29 Comparação entre a variação da resistividade elétrica corrigida e da não corrigida dos corpos de prova frente a variação da salinidade da água.	80
Figura 4.30 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 2N, b) CP 3N, c) CP 4N, d) CP 5N, e) CP 6N, f) CP 7N.	82
Figura 4.31 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I. ...	84

Figura 4.32 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 2M, b) CP 4M, c) CP 5M.	84
Figura 4.33 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor normal.	85
Figura 4.34 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor intermediária.	85
Figura 4.35 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor modificada.....	86
Figura 4.36 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 2N, b) CP 3N, c) CP 4N, d) CP 5N, e) CP 6N, f) CP 7N.....	89
Figura 4.37 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.....	92
Figura 4.38 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 2M, b) CP 4M, c) CP 5M.	93
Figura 4.39 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,700: CP 6N, CP 2N, CP 1I.	95
Figura 4.40 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,640: CP 3N, CP 5N, CP 2I.	95
Figura 4.41 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,608: CP 4N, CP 3I, CP 7I.	96
Figura 4.42 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,550: CP 4I, CP 6I, CP 2M.	96
Figura 4.43 Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrica - comparação entre os copos de prova de 6” e 2”.....	98
Figura 4.44 Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrica - comparação entre os copos de prova de 6” e 2” – faixa de resistividade menor.....	98
Figura 4.45 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor normal.....	100
Figura 4.46 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor normal.....	100

Figura 4.47 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor intermediária.	101
Figura 4.48 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor intermediária.	101
Figura 4.49 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor modificada.	102
Figura 4.50 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor modificada.....	102
Figura 4.51 Variação do mini-CBR com a umidade de compactação.	104
Figura 4.52 Variação da resistência última à compressão simples com a umidade de compactação.....	104
Figura 4.53 Variação do mini-CBR com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.	105
Figura 4.54 Variação da resistência última à compressão simples com a umidade de compactação – copos de prova de mesmo índice de vazios.	105
Figura 4.55 Variação do módulo tangente inicial com a umidade de compactação.	107
Figura 4.56 Variação do módulo de resiliência com a umidade de compactação.	108
Figura 4.57 Variação do módulo tangente inicial com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.....	109
Figura 4.58 Variação do módulo de resiliência com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Relação das metodologias de execução da metodologia MCT.....	25
Tabela 3.2 Relação das metodologias utilizadas na difratometria de raios-X.	27
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de peso específico dos grãos - solo Noroeste.....	45
Tabela 4.2 Resultados da análise granulométrica da amostra.....	46
Tabela 4.3 Resultados da caracterização e classificação da amostra.	50
Tabela 4.4 Resultados dos ensaios da metodologia MCT: classificação tradicional e expedita.	50
Tabela 4.5 Resultados das análises químicas.....	53
Tabela 4.6 Minerais identificados no difratograma.	55
Tabela 4.7 Valores de peso específico aparente seco, umidade, grau de saturação e índice de vazios dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.....	57
Tabela 4.8 Valores de resistência e resistividade elétrica dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.....	62
Tabela 4.9 Valores de condutividade e resistividade elétrica das águas estudadas.	74
Tabela 4.10 Valores dos índices físicos e resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com as águas de diferentes salinidades.....	76
Tabela 4.11 Correção da resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com as águas de diferentes salinidades.	80
Tabela 4.12 Valores de mini-CBR e resistência última à compressão simples.	103
Tabela 4.13 Valores dos módulos de resiliência e tangente inicial obtidos por meio dos ensaios mecânicos.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	-	Área da seção transversal do sólido
AASHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	<i>Association Society for Testing and Materials</i>
c	-	Concentração de sólidos dissolvidos
CBR	-	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CEFTRU	-	Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes
CTC	-	Capacidade de troca catiônica
ddp	-	Diferença de potencial
DF	-	Distrito Federal
DMT	-	<i>Dilatometer Test</i>
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
e	-	Índice de vazios
ERB	-	<i>Electrical Resistivity Box</i>
ERP	-	<i>Electrical Resistivity Probe</i>
<i>et al.</i>	-	E outros
g	-	Gramas
h	-	Comprimento inicial de referência do corpo de prova ensaiado
i	-	Corrente elétrica
I _a	-	Índice de atividade
I _p	-	Índice de plasticidade
K _i	-	Fator de condutividade
kN/m ³	-	Quilo Newtons por metro cúbico
kPa	-	Quilo Pascal
l	-	Comprimento do sólido
LENC	-	Laboratório de Engenharia e Consultoria
LER	-	Laboratório de Engenharia Rodoviária
LVDT	-	Transdutor de deslocamento
m	-	Metro
MCT	-	Miniatura; Compactado; Tropical
MCV	-	Moisture Condition Value

M_R	-	Módulo de Resiliência
NBR	-	Norma Brasileira de Regulamentação
Nº	-	Número
pH	-	Potencial hidrogeniônico
P_i	-	Perda de massa por imersão
PVC	-	Poli cloreto de vinila
R	-	Resistência elétrica
RCPTU	-	Piezocone resistivo
SP	-	São Paulo
Sr	-	Grau de saturação
SUCS	-	Sistema de Classificação Unificada
TRB	-	<i>Transportation Research Board</i>
UnB	-	Universidade de Brasília
V	-	Diferença de potencial
w	-	Umidade gravimétrica
w_L	-	Limite de liquidez
$w_{ótimo}$	-	Umidade ótima
w_P	-	Limite de plasticidade
Δh	-	Deslocamento vertical máximo
ϵ_1	-	Deformação resiliente
γ_d	-	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dmáx}$	-	Peso específico aparente seco máximo
γ_s	-	Peso específico dos grãos sólidos
θ_w	-	Umidade volumétrica
ρ	-	Resistividade elétrica
ρ_w	-	Massa específica da água
σ	-	Condutividade
σ_1	-	Tensão principal maior
σ_3	-	Tensão principal menor
σ_d	-	Tensão desviadora
Ω	-	Ohm
”	-	Polegada

% - Porcentagem

°C - Grau Celcius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 RESISTÊNCIA, RESISTIVIDADE E LEI DE OHM – CONCEITOS BÁSICOS ..	5
2.2 MÉTODOS DE MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLOS EM LABORATÓRIO	6
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS SOLOS.....	14
2.2.1 Grau de Saturação.....	14
2.2.2 Tipo de Solo.....	15
2.2.2.1 Areias	16
2.2.2.2 Argilas	16
2.2.2.3 Solos Heterogêneos.....	17
2.2.3 Influência da compactação	17
2.2.3.1 Energia de compactação.....	18
2.2.3.2 Umidade de compactação.....	18
2.2.4 Fluido intersticial.....	18
2.2.4.1 Concentração eletrolítica do fluido intersticial.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 SOLO UTILIZADO	21
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	23
3.2.1 Caracterização Geotécnica	23
3.2.2 Metodologia MCT.....	25
3.2.3 Caracterização Química	26
3.2.4 Caracterização Mineralógica – Difração de Raios-X	26
3.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	27
3.3.1 Estudo da Condutividade Elétrica da Água	30
3.4 MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	31
3.5 PROCESSO DE SECAGEM E UMEDECIMENTO E OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA.....	35
3.5.1 Papel Filtro.....	36
3.5.2 Medida de Resistividade Elétrica.....	38
3.6 ENSAIOS MECÂNICOS.....	39
3.6.1 Módulo de Resiliência.....	39
3.6.2 Mini - CBR.....	42
3.6.3 Compressão Simples	43
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	45
4.1.1 Caracterização Geotécnica	45
4.1.2 Caracterização MCT	50
4.1.3 Caracterização Química	53
4.1.4 Caracterização Mineralógica – Difração de Raios-X	54
4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	55
4.3 ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	58
4.3.1 Medidas de Resistividade Elétrica nos Corpos de Prova de 6”.....	58

4.3.2 Comparação Entre a Resistividade Elétrica e as Características Físicas dos Corpos de Prova de 6”	63
4.4 ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....	74
4.5 ENSAIOS PARA A DEFINIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA	81
4.5.1 Comparação Entre a Resistividade Elétrica e Sucção Matricial	87
4.6 AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DAS AMOSTRAS FRENTE AOS PROCESSOS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO.....	94
4.6.1 Relação Entre Resistividade Elétrica e Teor de Umidade Volumétrica, Comparação Entre os Copos de Prova de 6” e 2”	97
4.7 ENSAIOS MECÂNICOS	99
4.7.1 Mini-CBR e Compressão Simples	99
4.7.2 Módulo de Resiliência (M_R) e Módulo Tangente Inicial (E_i)	106
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
6.1 CONCLUSÕES	111
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

A compactação é um processo mecânico pelo qual se busca melhorar as características hidráulicas e mecânicas dos solos, reduzindo o seu índice de vazios. A redução do índice de vazios durante a compactação é realizada expulsando o ar que ocupa os poros. No entanto, esse processo não consegue eliminar todo o ar presente, permanecendo ar ocluído no interior da massa de solo, o que ocasiona um estado de não saturação no material.

O principal objetivo da compactação é obter um solo capaz de manter um comportamento adequado por toda a vida útil da obra. As propriedades requeridas variam conforme a aplicabilidade do produto acabado, mas valores adequados de resistência e compressibilidade estão entre os principais.

Dentro deste contexto, o controle de compactação torna-se uma das etapas mais importantes no processo de construção de maciços compactados e estruturas de pavimento, tendo em vista que todas as considerações feitas em projeto são aferidas em campo no momento da construção, pela obtenção da densidade seca máxima e umidade do solo compactado.

Bourdeaux (1982), segundo Komesu (2001), afirma que o controle de compactação não deve ser entendido como sinônimo de determinação rotineira do grau de compactação e do desvio de umidade, e que o procedimento de liberação de camadas compactadas, baseado na determinação dos parâmetros de compactação e pela comparação dos valores obtidos com as faixas especificadas, é totalmente inapropriado. Ele ainda comenta que a determinação por cálculo de valores médios e desvios padrões do grau de compactação e desvio de umidade pode mascarar a real qualidade do maciço.

Aquino *et al.* (2009) estudando a variação do comportamento da curva de compactação, variando os processos de preparação de amostras (com e sem pré secagem), demonstraram que, se adotadas como referência as curvas de compactação obtidas com pré-secagem dos solos, pode-se não alcançar no campo a compactação nas condições ideais, de umidade e peso específico aparente seco, estabelecidas em projeto. Desta maneira, a liberação ou não da camada compactada sem o aferimento do comportamento mecânico do maciço pode conduzir a erros consideráveis, visto que, para solos compactados, pequenas variações de peso específico e umidade podem afetar em proporções inaceitáveis os resultados para um estudo paramétrico em termos de deformação e fluxo, por exemplo.

As técnicas tradicionais de controle de compactação, como frasco de areia e *speedy* ou o controle de compactação pelo método Hilf, ainda são as mais utilizadas em obras de pavimentação e construção de aterros. No entanto, a busca por novas técnicas de controle de compactação vem se tornando cada vez maior, tendo em vista que as técnicas tradicionais demandam um certo tempo e ainda fornecem informações pontuais do estado físico do solo, sem inferir nada sobre seu comportamento. Diversas técnicas alternativas vêm sendo estudadas para a avaliação e controle de qualidade de maciços compactados. Os estudos mais recentes visam, além de avaliar o estado físico do solo, também inferir sobre o seu comportamento mecânico, tendo em vista que é esse o real interesse de um bom projeto geotécnico, podendo-se destacar a utilização do Penetrômetro do tipo Panda, do Dilatômetro de Marchetti e do Pressiômetro Pencil.

Queiroz (2008) em estudos realizados na Universidade de Brasília buscou avaliar, com base em resultados de laboratório, os parâmetros geomecânicos do solo compactado oferecidos pelo Dilatômetro de Marchetti (DMT) e verificar o seu potencial de utilização no controle de qualidade da compactação de aterros. As análises realizadas pela autora apontaram o ensaio dilatométrico (DMT) como uma ferramenta de controle de compactação em potencial, que deve ser melhor estudada, principalmente no que diz respeito à consideração dos efeitos da sucção em seus resultados.

Outro estudo relevante dentro deste contexto foi realizado por Batista (2007). A autora buscou avaliar em campo características mecânicas de camadas de pavimentos utilizando três equipamentos: GeoGauge, Pressiômetro Pencil e Penetrômetro Panda. Os resultados encontrados pela autora demonstram que a utilização destes ensaios na avaliação de camadas estruturais de pavimentos seria uma boa alternativa, principalmente a utilização do GeoGauge, visto que trata-se de um equipamento com baixo custo de aquisição, fácil manuseio, alto potencial para armazenamento de dados e rapidez na execução de ensaios. A autora afirma ainda que o equipamento GeoGauge permite controle e interferência no processo de compactação das obras de engenharia em tempo real, evitando posteriores intervenções corretivas.

Nos últimos anos vem crescendo muito o estudo de técnicas modernas de investigação geofísicas, que possibilitem medições de propriedades do solo de maneira indireta. Nestes estudos, em geral, propriedades específicas do solo são medidas e sobre o resultado é feita uma interpretação, objetivando chegar a conclusões sobre o estado do maciço analisado. A medida da resistividade elétrica do solo surge como um bom exemplo de medição indireta. O

objetivo é perceber características do perfil geotécnico, medindo-se a resistividade elétrica do meio.

No entanto para uma aplicação correta desta técnica na avaliação de maciços de solo ou até mesmo para processos de controle de compactação, é necessário possuir conhecimento suficiente para poder interpretar os resultados, como por exemplo, a forma como a resistividade elétrica do solo se comporta frente às variações de suas características físicas tais como densidade, umidade e grau de saturação entre outras.

Dentro deste contexto, o presente trabalho realiza um estudo inicial e busca avaliar, em laboratório, o comportamento da resistividade elétrica de um solo argiloso compactado característico do Distrito Federal frente às variações de suas características físicas. Espera-se que o entendimento deste comportamento possa subsidiar a utilização futura das técnicas de eletroresistividade em campo como uma alternativa no controle e avaliação de maciços compactados.

1.2 OBJETIVOS

Essa dissertação tem por objetivo principal avaliar em laboratório o comportamento da resistividade elétrica de um solo argiloso compactado, característico do Distrito Federal, visando relacioná-la com características indicativas do seu estado físico (índice de vazios - e , grau de saturação - S_r , peso específico aparente seco - γ_d , umidade gravimétrica - w e umidade volumétrica - θ_w). Com isso, espera-se avaliar o potencial do uso de técnicas geofísicas eletroresistivas em controle e avaliação de maciços compactados.

Buscou-se também como objetivo secundário, tendo como foco a pavimentação rodoviária, entender para o solo estudado, como os parâmetros condicionantes dos projetos de pavimentação (CBR, módulo de resiliência, módulo de elasticidade e resistência à compressão simples) se comportam com a variação destas características físicas. E, com esse entendimento, avaliar como as variações existentes entre os índices físicos obtidos de forma indireta (pela relação com a resistividade elétrica) e direta podem afetar o comportamento mecânico do mesmo.

Trata-se, portanto, do primeiro trabalho nesta linha de pesquisa no Programa de Pós Graduação em Geotecnia, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB e, desta forma, objetiva-se também, com esta dissertação, a aquisição de experiência no que diz respeito a medidas de resistividade elétrica de solos compactados em laboratório.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, permitindo o desenvolvimento de um texto lógico e de fácil compreensão e cujos assuntos abordados em cada um dos capítulos são brevemente descritos a seguir:

- Capítulo 1: É feita introdução ao assunto, com algumas considerações sobre a importância do tema, e por fim são apresentados os objetivos e o escopo da dissertação;
- Capítulo 2: Consiste de uma revisão bibliográfica fornecendo suporte à pesquisa, abordando assuntos como: medidas de resistividade elétrica em laboratório e fatores que afetam a resistividade elétrica dos solos;
- Capítulo 3: Apresenta as características do solo utilizado na pesquisa. É descrita, ainda, a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho experimental, mostrando os ensaios realizados;
- Capítulo 4: São apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados;
- Capítulo 5: Estão sintetizadas as principais conclusões obtidas durante a pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESISTÊNCIA, RESISTIVIDADE E LEI DE OHM – CONCEITOS BÁSICOS

A resistência elétrica (R) é uma grandeza física que expressa o “impedimento” sofrido pelos portadores de carga, sujeitos à ação de um campo elétrico, ao atravessarem de um ponto a outro em um determinado “corpo”, sendo dependente das dimensões e do tipo de material do qual este corpo é constituído. Por outro lado, resistividade elétrica (ρ) é uma grandeza que também está relacionada a um impedimento sofrido pelos portadores de carga, porém, é uma propriedade intrínseca da matéria, sendo independente das dimensões do corpo estudado. Portanto, resistividade elétrica é uma propriedade do material. Segundo Giroto e Santos (2002) outros exemplos de propriedade da matéria são: índice de refração, calor específico, densidade, dureza, elasticidade, viscosidade, temperatura de fusão, temperatura de transição vítrea, etc.

A Equação 2.1 é a expressão matemática para a lei de Ohm, que é verificada em muitos materiais isotrópicos. Neste caso, a corrente elétrica (i) no interior do material varia linearmente com a tensão aplicada (v), sendo a resistência elétrica (R), a constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas. Se o modelo proposto pela Equação 2.1 for verificado, dizemos que o material analisado é um condutor (ou resistor) ôhmico (Figura 2.1).

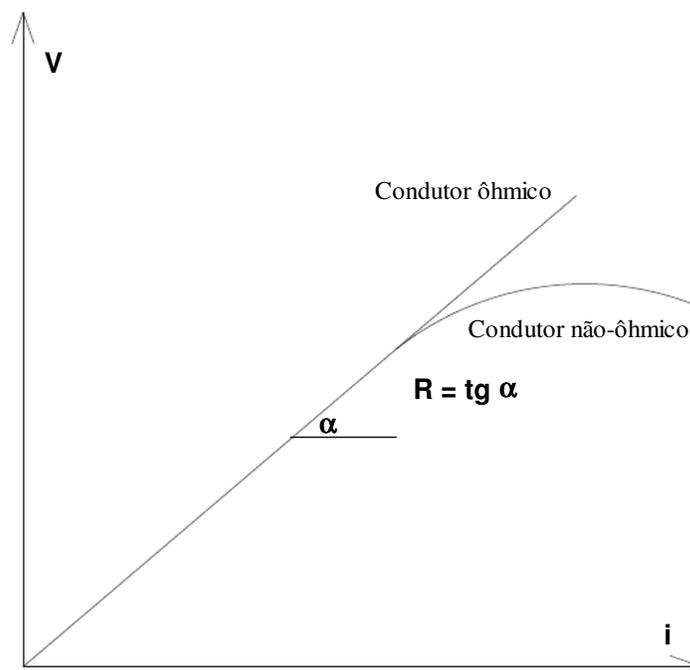


Figura 2.1 Modelo de comportamento de condutores ôhmicos e não-ôhmicos.

$$R = \frac{V}{i} \quad (2.1)$$

Onde:

R = resistência elétrica (ohms);

V = diferença de potencial (volts);

i = corrente elétrica (ampére).

A relação entre resistência e resistividade elétrica de um material é expressa pela Equação 2.2

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Onde:

R = resistência elétrica (ohms);

l = comprimento do sólido (m);

A = área da seção transversal do sólido (m²);

ρ = resistividade elétrica (ohms.m).

Segundo Giroto e Santos (2002) essa relação não é geral, sendo válida apenas para materiais uniformes e isotrópicos, com seções transversais uniformes ao longo de seu comprimento.

2.2 MÉTODOS DE MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLOS EM LABORATÓRIO

Na engenharia geotécnica a medida de resistividade elétrica foi motivo de estudo, por muitos anos, com o intuito de estimar a porosidade de solos não coesivos. Os primeiros estudos nesse sentido foram realizados por Kroezen em 1981 (ROBERTSON *et al*, 1998). Recentemente esse estudo tem sido utilizado para realizar investigações de campo e avaliação do percentual de contaminação de solos. A medida da resistividade elétrica do solo é uma forma de investigação indireta que pode ser correlacionada com diferentes propriedades físicas do solo, tais como a porosidade, condutividade hidráulica e propriedades físico-químicas (LUNNE *et al.*, 1997).

A partir de ensaios de laboratório é possível estudar as relações entre a resistividade elétrica e os fatores que a influenciam, visto que é possível controlar, em laboratório, diversas variáveis encontradas durante as análises dos ensaios de campo. Diversos autores têm apresentado diferentes técnicas para medir a resistividade elétrica de solos em laboratório e para diferentes finalidades.

As técnicas utilizadas em laboratório para a medida da resistividade elétrica são relativamente recentes. Geralmente essas técnicas visam a obtenção de parâmetros resistivos de referência para sua utilização em campo, visando, em sua maioria, o reconhecimento geotécnico ou avaliação do grau de contaminação em terrenos.

Aparatos para a medida da resistividade elétrica em laboratório para amostras compactadas foram desenvolvidos, com o objetivo de avaliar a qualidade da compactação dos solos. Kalinsky e Kelly (1994) desenvolveram uma célula circular de material isolante, com oito eletrodos, como mostra a Figura 2.2. Desta forma, realizavam-se oito medidas de resistência de modo separado, utilizando-se quatro eletrodos por vez, sendo os dois mais externos utilizados como eletrodos de corrente e os internos como eletrodos potenciais.

Outro aparato desenvolvido constituía-se de um molde em PVC de dimensões semelhantes ao cilindro de compactação tipo Proctor Normal. No aparato desenvolvido por Abu-Hassanein e Benson (1994), o campo elétrico era induzido através de dois discos de cobre posicionados nas extremidades do corpo de prova, enquanto a diferença de potencial era medida entre duas barras, também de cobre, cravadas no corpo de prova (Figura 2.3). Os resultados desses ensaios mostraram que a resistividade de argilas compactadas é influenciada pelo teor de umidade, esforço de compactação e saturação inicial do corpo de prova.

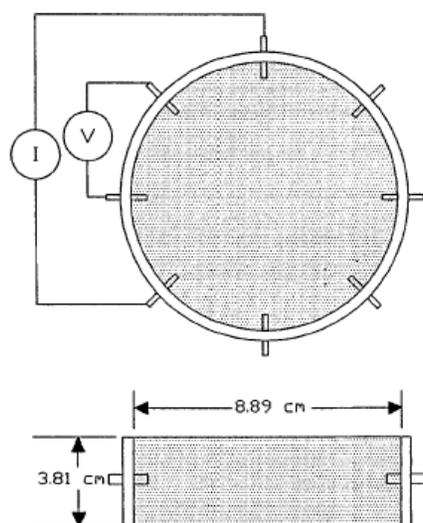


Figura 2.2 Aparato de medida de resistividade elétrica em laboratório (KALINSKY E KELLY, 1994).

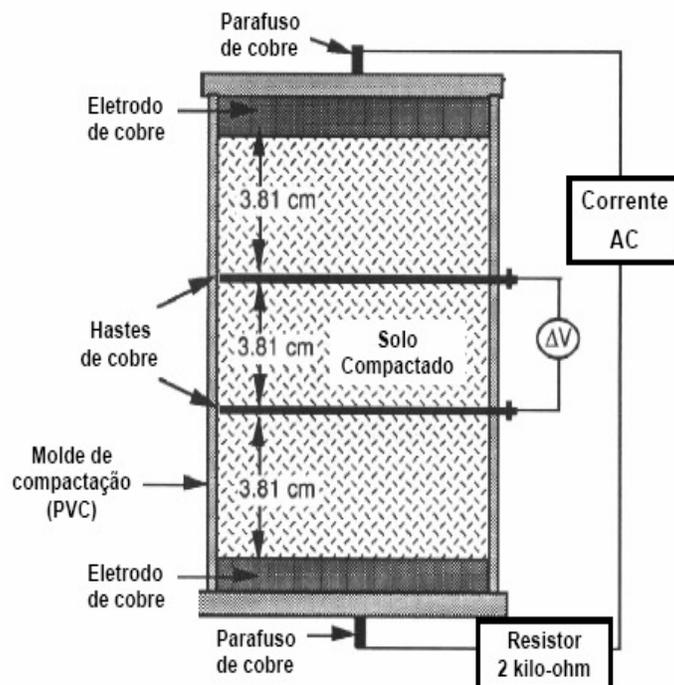


Figura 2.3 Aparato de medida de resistividade elétrica em laboratório (ABU-HASSANEIN E BENSON, 1994).

Abu-Hassanein *et al.* (1996) apresentaram várias relações entre a resistividade e algumas características de diferentes tipos de solos argilosos, utilizando o aparato da Figura 2.3. Os autores apresentaram resultados de medida de resistividade elétrica de um solo ensaiado nas direções vertical e horizontal, a fim de verificar a anisotropia. Eles realizaram os ensaios em um solo compactado, em diferentes teores de umidade, na energia Proctor normal reduzido (utilizando a metade do número de golpes desta energia). Os resultados apresentados pelos autores mostraram que, para umidades abaixo da ótima (ramo seco da curva de compactação), os valores de resistividade medidos na direção horizontal variaram entre 75 e 80 % daqueles medidos na direção vertical. Já no ramo úmido da curva de compactação, o efeito da anisotropia sobre os valores de resistividade horizontais foi menor, com estes variando entre 90 e 95% dos valores de resistividade medidos na direção vertical. Os autores afirmaram que os solos compactados com teores de umidade elevados tornam-se mais homogêneos, uma vez que no ramo seco existe a presença da macroestrutura entre os grãos de argila.

Abu-Hassanein *et al.* (1996) estudaram, também, a relação da resistividade elétrica com os limites de liquidez e plasticidade, coeficiente de permeabilidade, porcentagem de finos, fração de grossos, fração argilosa e temperatura. Verificou-se uma diminuição da resistividade com o aumento do limite de liquidez, do índice de plasticidade, da porcentagem

de finos, da fração argilosa e da temperatura. Entretanto, quando se analisa o coeficiente de permeabilidade, verifica-se que este tende a crescer com o aumento da resistividade. Observou-se ainda que não foi possível obter uma única correlação do coeficiente de permeabilidade com a resistividade, para grande parte dos solos ensaiados, visto que o coeficiente de permeabilidade depende da saturação inicial do corpo de prova e esta também varia com a resistividade.

Fukue *et al.* (1999) realizaram ensaios de adensamento com medida de resistividade para verificar a influencia desta com a estrutura de solos argilosos saturados. Eles estudaram duas argilas, uma pouco ativa (Kibushi Clay) e uma bentonita. Os resultados mostraram que a resistividade aumenta com a diminuição dos índices de vazios. Eles também relacionaram a resistividade com o teor de umidade para as mesmas argilas remoldadas a uma carga constante.

Os autores observaram no processo de umedecimento um decréscimo da resistividade quando o teor de umidade se aproximava do limite de plasticidade e relacionaram esta diferença de comportamento com descontinuidade da água existente nos poros no trecho em que os valores de resistividade eram muito elevados, existindo somente água adsorvida pelas partículas. No instante em que as bolhas de água começam a se ligar, a resistividade diminui de forma considerável, tendendo a permanecer num patamar constante até um teor de umidade próximo do limite de liquidez, aumentando um pouco depois deste.

Daniel (1997), em estudos na universidade de British Columbia, acoplou o dispositivo para medida da resistividade de um piezocone (RCPTU) a um molde de ensaio de compactação feito com material isolante (Figura 2.4), através de dois eletrodos de latão localizados na extremidade da amostra. Esses eletrodos foram conectados aos dois eletrodos externos do piezocone (envio e recebimento de corrente elétrica) e a diferença de potencial era medida diretamente através dos dois eletrodos internos do piezocone.

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

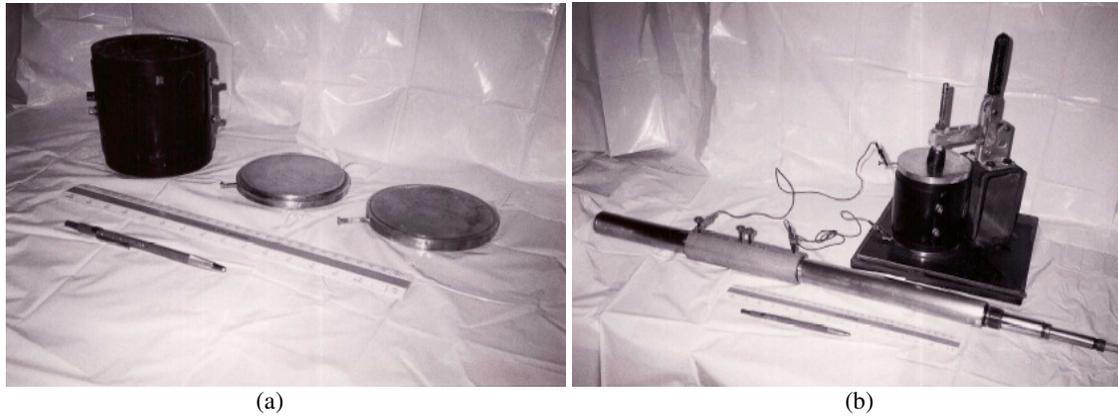


Figura 2.4 Equipamento para medida da resistividade elétrica em laboratório em amostras compactadas (DANIEL, 1997): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado.

No Brasil, pode-se destacar os trabalhos de Nacci *et al.* (2003), Pacheco (2004), Mondelli *et al.* (2008), Peixoto *et al.* (2010) e Yamasaki *et al.* (2010), que realizaram medidas de resistividade elétrica de solos em laboratório, com o objetivo de auxiliar a interpretação dos resultados de ensaios de piezocone resistivo.

Nacci *et al.* (2003) desenvolveram uma célula cúbica de acrílico, onde o solo era colocado com porosidades diferentes e a condutividade elétrica era medida utilizando-se dois eletrodos de cobre, dispostos em duas faces opostas do cubo (Figura 2.5)

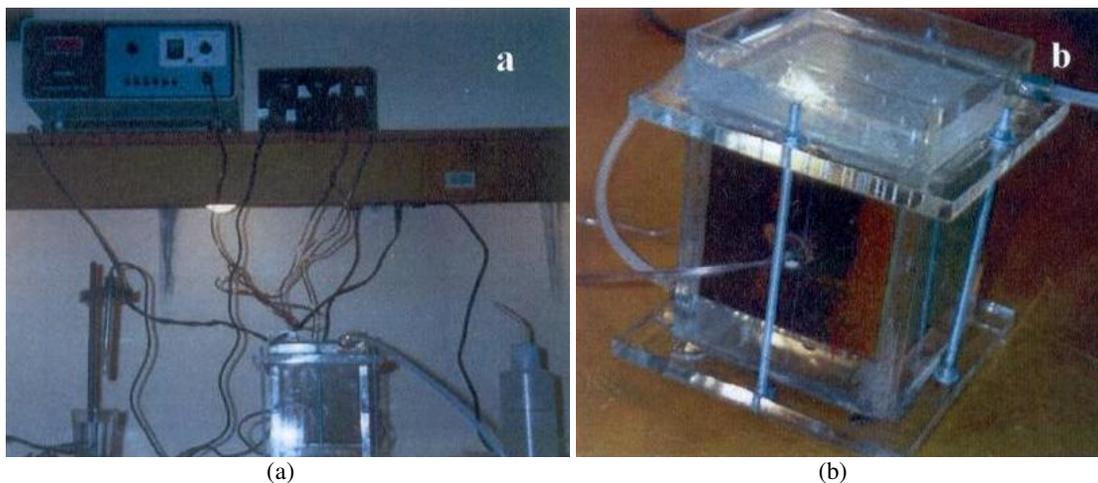


Figura 2.5 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (NACCI *et al.*, 2003): a) aparato de medida montado, b) célula cúbica acrílica.

Pacheco (2004) realizou medidas de resistividade com o piezocone resistivo em laboratório (Figura 2.6) utilizando areias de praia lavadas, de diferentes granulometrias e forma de grãos, e caulinita, homogeneizada em uma bateadeira industrial com diferentes concentrações salinas. Os corpos de prova eram obtidos por pluviação (o material era lançado

em um balde utilizando-se um funil, com abertura e altura de lançamento conhecidas), a fim se obter diferentes índices de vazios.

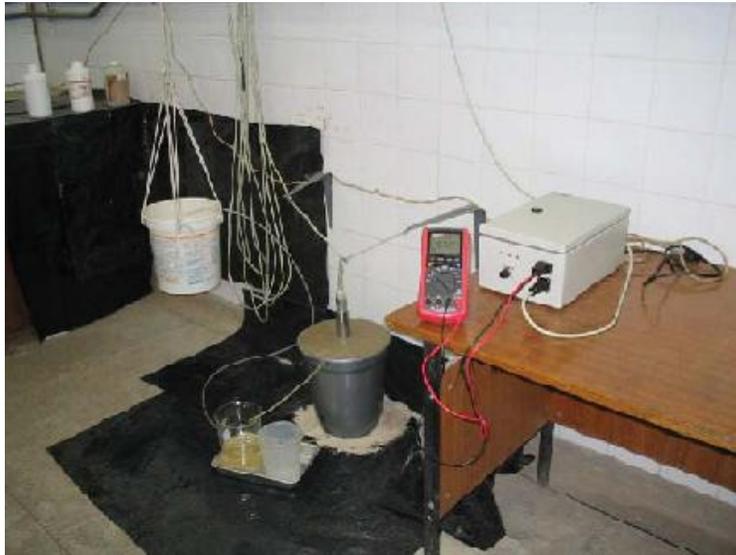


Figura 2.6 Aparato de medidas de resistividade em laboratório (PACHECO, 2004).

O sistema para testes de resistividade em laboratório desenvolvido por Mondelli *et al.* (2008) foi baseado na proposta de Daniel (1997). Foram instalados dois eletrodos de aço-inox, um em cada extremidade, e dois no centro do corpo-de-prova, para transferência da corrente elétrica e medida da diferença de potencial, respectivamente (Figura.2.7). Sendo que, para a aquisição de dados, foi utilizado um eletrorresistivímetro de campo.



Figura 2.7 Aparato utilizado para medidas de resistividade em laboratório (MONDELLI *et al.*, 2008).

Peixoto *et al.* (2010) e Yamasaki *et al.* (2010) realizaram ensaios de laboratório para a avaliação da resistividade elétrica em uma areia argilosa sedimentar, da Formação Marília, proveniente do aterro de resíduos sólidos da cidade de Bauru (SP). Os autores realizaram os ensaios em corpos de prova compactados na energia Proctor normal, com o intuito de avaliar a interferência de fatores tais como teor de umidade, compactação, porosidade e grau de saturação na resistividade elétrica da amostra estudada.

Para tanto, os ensaios de resistividade em laboratório foram realizados de duas maneiras: inicialmente instalando-se duas placas de cobre nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos (Figura 2.8 a e Figura 2.9). Posteriormente, era cravado no mesmo corpo de prova um dispositivo de medida de resistividade elétrica com configuração semelhante a do piezocone de resistividade, mas em dimensões reduzidas (Figura 2.8 b).

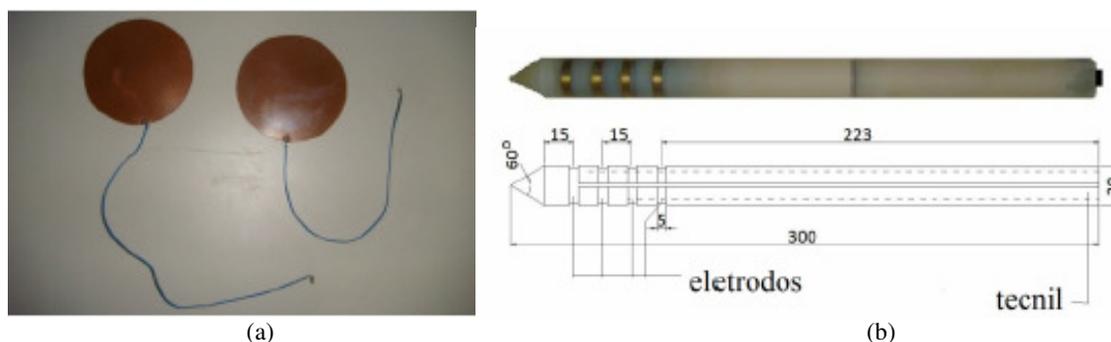


Figura 2.8 Equipamentos utilizados para medidas de resistividade em laboratório (PEIXOTO *et al.*, 2010 e YAMASAKI *et al.*, 2010): a) placas de cobre, b) dispositivo de medida de resistividade elétrica semelhante a piezocone de resistividade.



Figura 2.9 Configuração do ensaio realizado com as placas de cobre (PEIXOTO *et al.*, 2010 e YAMASAKI *et al.*, 2010): a) molde de compactação, b) aparato de medida montado.

Por meio deste estudo Peixoto *et al.* (2010) e Yamasaki *et al.* (2010) concluíram que, de maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios apresentaram o comportamento esperado e encontrado na literatura. Porém, foi observada uma discrepância na repetibilidade dos resultados obtidos no ramo seco da curva de compactação. Os autores destacam que essa mesma dificuldade também foi observada em ensaios de campo realizados com o piezocone de resistividade. Os autores também destacam que a curva, que representa a variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade, apresenta comportamento descendente com tendência a estabilização após o valor de umidade referente ao teor de umidade ótimo da amostra.

Realizando uma comparação entre os valores de resistividade elétrica medidos pelas duas técnicas apresentadas, Yamasaki *et al.* (2010) observaram que, para as umidades correspondentes ao ramo úmido da curva de compactação, os valores de resistividade elétrica, para ambos os equipamentos, são da mesma ordem de grandeza, sendo os obtidos pelo dispositivo cônico superiores àqueles medidos pelas placas de cobre. Já no ramo seco da curva de compactação, ou seja, na condição não saturada, os valores sofrem grande variação, sendo destacada pelos autores a necessidade de ser melhor estudada a aplicabilidade dos ensaios de resistividade elétrica nessas condições de compactação.

Recentemente, outras formas de medida da resistividade elétrica em laboratório têm surgido, como, por exemplo, as mini-sondas apresentadas por Screeddeep *et al.* (2004). Estes autores obtiveram relações empíricas entre a resistividade e o grau de saturação para um solo siltoso e uma argila branca comercial da Índia. Os autores realizaram a medida de resistividade em laboratório de duas formas: uma caixa cúbica constituída de 3 eletrodos de latão parafusados em cada face, chamada de *electrical resistivity box* – ERB, e uma mini-sonda constituída de 4 anéis de cobre inseridos numa haste de ebonite, chamada de *electrical resistivity probe* –ERP.

Os autores observaram que existe uma zona de transição ($40 \% \leq Sr \leq 60 \%$), acima da qual, os valores de resistividade permanecem praticamente constantes, e abaixo a resistividade entre os vazios preenchidos com ar (muito elevada) tem grande influência sobre a resistividade integral do solo.

Boszczowski e Silva (2006) compararam medidas de resistividade em amostras deformadas e indeformadas para diferentes solos de um perfil de intemperismo. Os resultados mostraram que a estrutura dos solos apresentou-se como uma ponte para a passagem de corrente elétrica, ou seja, o solo estruturado conduz mais eletricidade que o solo desestruturado; principalmente para teores de umidade abaixo de 30%. Observou-se também

que os valores de resistividade aumentaram com o grau de intemperismo dos diferentes solos estudados, com exceção da camada de solo mais superficial.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS SOLOS

A condução de corrente elétrica ocorre, em condutores metálicos, devido ao deslocamento de elétrons em partículas carregadas negativamente, quando um campo elétrico é aplicado. Em solos e rochas, a condução elétrica pode ocorrer devido a diferentes fenômenos. Miranda Neto (2002) destaca dois deles: a condução eletrônica e a condução eletrolítica.

A condução eletrônica é também conhecida como condução Ôhmica, por obedecer à Lei de Ohm. Segundo Weemes (1990) esse tipo de condução, nos solos, ocorre nas superfícies de alguns tipos de solos constituídos de minerais condutores. Esse tipo de condução é mais comum em argilas devido a sua elevada superfície específica e à forma lamelar das partículas.

Já a condução eletrolítica ocorre por meio do deslocamento de carga, originada pela migração de íons. Na presença de um campo elétrico, este tipo de condução ocorre em soluções eletrolíticas. A condução eletrolítica é a que apresenta maior influência sobre a condutividade total do solo, devido a existência de íons dissolvidos nos interstícios do solo (CAMPANELLA e WEEMES, 1990 e ROBERTSON *et al.*, 1998).

Segundo Pacheco (2004), quando se realiza a medição da resistividade do solo, obtém-se uma medida que é o resultado da sobreposição de diversos fenômenos de condução. A resistividade do solo depende de características do meio, como a condutividade do fluido intersticial, da porosidade, da irregularidade dos canalículos, da superfície específica e da capacidade de troca iônica e mineralogia das partículas sólidas, entre outras. A seguir é apresentada uma breve discussão sobre as principais propriedades que afetam o comportamento da resistividade elétrica dos solos.

2.2.1 Grau de Saturação

Na condição não saturada o solo é composto basicamente por três fases, duas fases praticamente são isolantes, a sólida e a de ar, e uma que pode ser ou não condutora que é a fase líquida (PACHECO, 2004). Quanto menor for o grau de saturação do solo, menor será o

espaço disponível para a condução de corrente elétrica, conseqüentemente maior será sua resistividade elétrica.

Estando o material saturado, quanto maior o índice de vazios maior é a área para passagem de corrente elétrica. Segundo Pacheco (2004) o mesmo ocorre, quando este material encontra-se no seu estado não saturado, ou seja, os vazios do solo não estiverem totalmente preenchidos por um líquido, a resistividade elétrica será tanto maior quanto menor for o índice de vazios do material, isso para um mesmo grau de saturação. Sob esse ponto de vista, é de se esperar que o mesmo material em diferentes índices de vazios tenha maior ou menor resistividade elétrica, dependente do quanto é o seu grau de saturação.

Vários autores apresentam diferentes observações quando da possibilidade de investigar um meio não saturado. Watabe *et al.* (2002) recomendam que os resultados obtidos nessa região sejam desconsiderados, visto que existe uma dificuldade de correlacionar os parâmetros medidos às propriedades físicas. Já Abu-Hassanein *et al.* (1996) relatam que existe uma relação única entre o grau de saturação inicial de solos compactados e a resistividade elétrica medida.

2.2.2 Tipo de Solo

O tipo de solo também tem influência sobre a resistividade elétrica do material, e este fato está associado à forma dos grãos presentes na amostra. Ao diminuir-se o tamanho das partículas muda-se também a forma dos grãos presentes, que passam de uma forma arredondada para uma lamelar, o que aumenta a superfície de contato entre as partículas e altera o comportamento resistivo do meio (WEEMES, 1990).

No entanto, cabe ressaltar que segundo Pacheco (2004) a influência das formas dos grãos é tão maior quanto menor for a saturação do material. Para o autor, em condições saturadas o tipo de solo pode ter pouca influência, visto que em tal condição o fluido intersticial é o maior responsável pela condutividade elétrica do meio. Pode-se realizar observação semelhante em solos que apresentam o fluido intersticial muito condutivo.

Em regiões próximas ao mar a diferença entre os valores de resistividade medidos para diferentes extratos de solo pode não ficar evidente. Isso ocorre porque a condução acontece muito facilmente pelo fluido, por haver muitos íons na solução intersticial. Assim, mesmo que os caminhos de fluxo mudem, a diferença não é tão expressiva (WEEMES, 1990).

2.2.2.1 Areias

Segundo Weemes (1990) as partículas de areia, em geral formadas por partículas de quartzo, são consideradas como elementos isolantes dentro de um meio condutor, caso o meio esteja saturado. Esse mineral é caracterizado por ser constituído por cristais eletricamente descarregados. Apresenta, também, área de contato pequena entre as partículas, o que resulta em uma corrente superficial praticamente nula. Devido a estes aspectos é de se esperar que as areias apresentem resistividades maiores que as das argilas (FUKUE *et al.*, 1999).

Lunne *et al.* (1997) afirmam que ao introduzir o cone no solo, sucedem-se consequentes processos de ruptura, mudando, assim, o estado de compactidade próximo ao corpo do cone. No processo de ruptura, os solos fofos tendem a sofrer compressão e os compactos tendem a se expandir. Portanto, há uma alteração entre os resultados medidos para areias no estado intacto e após a ruptura (WEEMES, 1990). Quando há alteração no estado de compactidade do solo, espera-se que haja, também, mudanças nas resistividades medidas.

2.2.2.2 Argilas

De modo geral, as argilas apresentam condutividade elétrica maior que a das areias, pois o índice de vazios das argilas é superior ao das areias. É importante salientar que nas argilas ocorrem outras formas de geração de corrente, como a superficial. Segundo Weemes (1990), esse tipo de condução ocorre devido a propriedades específicas das partículas sólidas, como uma elevada capacidade de troca catiônica ou elevado percentual de matéria orgânica. Em ambos os casos há cargas na superfície das partículas sólidas: no primeiro, localizadas na dupla camada (SOUZA SANTOS, 1975) e no segundo, devido à matéria orgânica; e por isso sofrem ação do campo elétrico.

Quando se introduz o cone no solo argiloso, ocorre um amolgamento na região próxima ao corpo do cone, entretanto, como a permeabilidade das argilas é muito baixa, a cravação ocorre a volume praticamente constante. Segundo Weemes (1990), não ocorre variação de resistividade entre o solo amolgado e o intacto, se for admitido que o comportamento resistivo seja, neste caso, dependente exclusivamente do índice de vazios e da umidade.

2.2.2.3 Solos Heterogêneos

Os solos classificados granulometricamente como bem graduados são os que apresentam o menor índice de vazios, visto que as partículas com menores dimensões ocupam os espaços dos poros. Neste caso, ocorre diminuição da área para que ocorra a condução eletrolítica, pois o caminho de fluxo de íons é reduzido.

Nem sempre solos bem graduados apresentam baixo índice de vazios. Dependendo da porcentagem de finos contida no solo e sua gênese, o solo pode apresentar-se com uma estrutura meta-estável com agregações. Nessa condição as partículas com maiores dimensões ficam envoltas com partículas mais finas o que gera microporos entre essas partículas e macroporos entre as agregações (FUTAI, 2002). Dessa forma, o transporte de íons pode ocorrer dentro dos poros de maior dimensão gerando, portanto, condução eletrolítica. Borner *et al.* (1968) afirmam que nestes tipos de solo ocorrem ainda correntes de natureza dielétrica.

Segundo Weemes (1990) a resistividade elétrica pode ser afetada de três maneiras com o aumento na porcentagem de finos em um solo arenoso. Na primeira o índice de vazios diminui devido à ocupação de vazios por partículas finas, resultando em um aumento da resistividade do solo. Se as partículas forem polarizadas, pode-se ter o segundo comportamento, que é uma redução da resistividade elétrica. E o terceiro comportamento, que também é possível, age no sentido de reduzir a resistividade devido ao aumento da superfície específica e do contato entre as partículas sólidas. Isso resulta em uma maior geração de corrente superficial. Em geral a resistividade elétrica aumenta à medida que os solos se tornam mais grossos (ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996).

2.2.3 Influência da compactação

Existem diversos fatores que influenciam a qualidade da compactação de solos, logo diferentes condições de compactação resultam em diferentes medidas de resistividade. Em tempos recentes o cone resistivo tem sido utilizado para efetuar o controle de compactação de “liners” argilosos (ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996). Para isso é necessário saber interpretar como as variáveis influenciam o resultado da resistividade medida.

2.2.3.1 Energia de compactação

Uma das maneiras de elevar o peso específico de um solo compactado é aumentar a energia de compactação, mantendo as demais variáveis constantes. Logo, tem-se uma diminuição do índice de vazios, e um conseqüente aumento da resistividade elétrica. No entanto, essa afirmação não é correta. Considerando a relação entre índices físicos, para uma umidade constante a redução do índice de vazios acarreta em uma elevação do grau de saturação. Como a condutividade elétrica é significativamente maior para meios mais próximos à saturação o aumento na energia de compactação diminui a resistividade (ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996).

Abu-Hassanein *et al.* (1996) realizaram medidas de resistividade em laboratório com dez tipos de solos distintos. Os autores observaram que, em todos os casos, para uma dada umidade de moldagem, a resistividade diminuiu ao se elevar a energia de compactação.

2.2.3.2 Umidade de compactação

Sabendo que a condutividade elétrica ocorre em grande parte pela fase líquida do solo, mesmo em condições não saturadas o aumento da umidade de compactação diminui a resistividade do solo (WEEMES, 1990). Abu-Hassanein *et al.* (1996) realizaram ensaios a diferentes umidades para três energias de compactação. Os autores observaram que, para umidades acima da ótima, a variação da umidade não resulta em diferenças expressivas no resultado da resistividade. Já no ramo seco, pequenas mudanças na umidade resultaram em variações significativas de resistividade. Isto, segundo os autores, deve-se à existência de ar contido nos vazios do solo, que é um elemento isolante.

Abu-Hassanein *et al.* (1996) calcularam o grau de saturação, e apresentaram os resultados medidos em função desse parâmetro. Os autores observaram que para cada tipo de solo existe uma relação inversa entre a resistividade e o grau de saturação. E destacaram também que a relação encontrada é independente da energia de compactação aplicada.

2.2.4 Fluido intersticial

Para a interpretação dos resultados, o solo é considerado um material trifásico constituído por sólidos, líquido e ar. A resistividade medida é função de todas as fases, mas o ar é sempre considerado um corpo isolante. A princípio, a maior parte da corrente elétrica é

conduzida pelo fluido intersticial, pois é nesse meio que ocorre mais facilmente o transporte de cargas, gerando a corrente eletrolítica (CAMPANELLA e WEEMES, 1990, LUNNE *et al.*, 1997). O tipo de líquido é, portanto, uma variável extremamente importante para a interpretação de resultados medidos.

Em um meio poroso saturado, em geral, a maior parte do transporte de íons ocorre na porção líquida devido à condução eletrolítica (CAMPANELLA *et al.*, 1998; ROBERTSON *et al.*, 1998; LUNNE *et al.*, 1997). A transferência de carga através dos eletrodos se dá por meio de reações de oxi-redução entre os elementos presentes na solução (CAMPANELLA e WEEMES, 1990). Por esse motivo, a maior ou menor resistividade é função dos elementos presentes no fluido, que ainda é afetada por fatores externos, tais como a temperatura (ABU-HASSANEIN *et al.*, 1996). Em geral, quanto mais íons presentes no fluido intersticial, maior será a condutividade. Entretanto, considerando um íon específico, outros fatores afetam a condutividade eletrolítica (WEEMES, 1990) como o tamanho do íon e a sua valência.

2.2.4.1 Concentração eletrolítica do fluido intersticial

Avaliando exclusivamente a concentração eletrolítica, a condução aumenta à medida que a quantidade de íons dissolvidos aumenta (CAMPANELLA e WEEMES, 1990; WATABE *et al.*, 2002; ROBERTSON *et al.*, 1998; LUNNE *et al.*, 1997). Isso acontece porque quanto mais partículas carregadas existem em solução, mais elementos carregados estarão em deslocamento. Entretanto a taxa de variação entre a resistividade e a concentração do meio não se dá por uma forma linear. Weemes (1990) observou que resistividades medidas para diferentes concentrações podem ser aproximadas a segmentos de reta em diferentes faixas de concentração. Dessa maneira, existe uma relação da forma apresentada na Equação 2.3.

$$c = \sigma.K_i \quad (2.3)$$

Onde:

c = concentração de sólidos dissolvidos (mg/l),

σ = condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$),

K_i = fator de condutividade, uma constante que depende da faixa de concentração eletrolítica no fluido intersticial.

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

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as principais informações do solo utilizado e é apresentada, de forma sucinta, a metodologia utilizada nos ensaios de caracterização geotécnica, metodologia MCT, ensaios químicos e mineralógicos e de forma mais detalhada a metodologia utilizada para obtenção das curvas características. Descreve-se a metodologia utilizada para a execução dos ensaios mecânicos (mini-CBR, módulo de resiliência e compressão simples), sendo também apresentado neste capítulo uma descrição detalhada do processo de compactação dos corpos de prova e a metodologia utilizada para a medida da resistividade elétrica nos mesmos.

3.1 SOLO UTILIZADO

Na região Centro-Oeste do país, particularmente no Distrito Federal, destaca-se a ocorrência de solos de comportamento laterítico finos argilosos. Deste modo, na seleção do solo a ser estudado na pesquisa teve-se a preocupação de utilizar uma amostra característica do solo regional. O solo aqui utilizado foi coletado na região da construção das obras de urbanização do Setor Noroeste – Brasília, DF. Esta escolha foi realizada tendo em vista que esta região está sendo hoje amplamente estudada, destacando-se aqui os estudos realizados pelos alunos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, Carlos Petrônio e Renata Conciani.

Para se proceder à coleta, tomou-se o cuidado de retirar a camada superficial com presença de matéria orgânica, em seguida o solo foi escavado e acondicionado em sacos plásticos, sendo transportado para o Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) do Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes (CEFTRU). Antes do início dos ensaios de caracterização, toda a amostra foi misturada, quarteada e novamente acondicionada em sacos, de forma a garantir sua homogeneidade.

A amostra usada nesta dissertação, denominada Solo Noroeste, foi coletada no talude de uma das valas escavadas para construção das galerias de água pluvial do setor Noroeste entre as coordenadas UTM 187.582 e 8.257 - 400 m da zona 23, meridiano central 45° WGr. E corresponde ao material superficial, coletado entre o primeiro e o segundo metro do perfil de intemperismo (Figura 3.1).



Figura 3.1 Coleta da amostra em campo: a) perfil do solo coletado, b) coleta do solo.

O solo proveniente do setor Noroeste é uma areia argilosa laterítica (Figura 3.2) de baixa plasticidade apresentando como mineral principal a gibbsita e consequentemente baixa atividade ($I_a = 0,27$). Este solo, devido ao processo de intemperismo que sofreu, apresenta grande diferença entre as granulometrias em ensaios com e sem defloculante, no entanto independente da análise granulométrica realizada (com ou sem defloculante), esse apresenta 100% do material passado na peneira N° 4 (4,76 mm) e 99,9% do material passado na peneira N° 10 (2,0 mm).



Figura 3.2 Aspecto visual da amostra - solo Noroeste.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Com o objetivo de conhecer as propriedades e classificar o solo utilizado na pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização, metodologia MCT, ensaios químicos e difração de Raios-X.

3.2.1 Caracterização Geotécnica

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU, localizado no Campus Darcy Ribeiro em Brasília, DF. A metodologia empregada nos ensaios seguiu as especificações constantes nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentadas a seguir. Antes da realização de cada ensaio, as amostras foram preparadas conforme prescrições da NBR 6457 (ABNT, 1986 a), ou seja, foram realizadas as operações de secagem e destorroamento.

a) Peso específico dos sólidos (γ_s , kN/m³)

Determinado pela média de três ensaios de acordo com a NBR 6508 e NBR 6458 (ABNT, 1984 a e 1984 b). O ensaio foi realizado em duas frações granulométricas: material passado na peneira Nº 40 (0,42 mm) e material entre as peneiras Nº 40 (0,42 mm) e Nº 4 (4,8 mm), visto que o peso específico dos sólidos consiste na relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume, podendo este ser variável com a faixa granulométrica analisada, pois depende dos minerais constituintes e da porcentagem de ocorrência de cada um deles no solo.

b) Limite de liquidez pelo método de Casagrande (w_L , %)

Determinado graficamente, obtendo-se a reta interpolada por, no mínimo, 3 pontos, de acordo com a norma de ensaio NBR 6459 (ABNT, 1984 c).

c) Limite de plasticidade (w_P , %)

Obtido executando-se, no mínimo, 3 determinações, de acordo com a norma de ensaio NBR 7180 (ABNT, 1984 d).

d) Índice de plasticidade (I_p , %)

Obtido pela diferença entre w_L e w_p .

e) Índice de atividade (I_a)

Obtido a partir da equação 3.1 (Barata, 1974).

$$I_a = \frac{I_p(\text{da fração menor que } 0,42 \text{ mm})}{\% < 2 \mu\text{m}(\text{na fração menor que } 0,42 \text{ mm})} \quad (3.1)$$

Onde:

I_a = Índice de atividade de Skempton;

I_p = Índice de plasticidade.

f) Granulometria

Visando avaliar a influência da pré-secagem no comportamento do solo em estudo, foram realizados ensaios de granulometria com sedimentação; com a amostra previamente seca ao ar conforme procedimento descrito na NBR 6457 (ABNT, 1986 a) e com a amostra na umidade natural de campo.

A granulometria, para a amostra seca ao ar, foi determinada segundo os procedimentos da norma de ensaio NBR 7181 (ABNT, 1984 e). No entanto, para a amostra na umidade natural, devido à dificuldade no processo de peneiramento, optou-se pela realização deste por meio do processo de lavagem. Submeteu-se 1000 gramas de material úmido ao chamado peneiramento grosso, sendo que a quantidade de amostra retida em cada peneira foi seca em estufa para determinação da massa seca (Figura 3.3 a). Do material passado neste peneiramento, retirou-se 70 gramas para a realização do procedimento de sedimentação. Após a sedimentação, o material foi lavado no conjunto de peneiras, chamado peneiramento fino (Figura 3.3 b). Posteriormente, a quantidade de amostra retida em cada peneira foi seca em estufa para determinação da massa seca.



Figura 3.3 Lavagem do material nas peneiras: a) peneiramento grosso, b) peneiramento fino.

De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (1996) a realização de ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante em solos tropicais pode gerar diferenças muitas vezes substanciais. Assim, quando se realiza o ensaio de granulometria com o uso de defloculante, pode-se não obter a granulometria real do solo, aquela que estará presente no campo. Devido a estas características, objetivando a análise da estabilidade estrutural das microconcreções, optou-se pela realização de duas análises granulométricas: uma com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio e outra apenas com o uso de água destilada.

3.2.2 Metodologia MCT

Com o objetivo de conhecer as propriedades do solo objeto desta pesquisa foram realizados ensaios da metodologia MCT tradicional e expedita (método das pastilhas). A Tabela 3.1 apresenta as metodologias utilizadas na execução dos ensaios.

Tabela 3.1 Relação das metodologias de execução da metodologia MCT.

Ensaio	Metodologia
Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Determinação da Perda de Massa por Imersão	DNER – ME 256/94
Solos Compactados em Equipamento Miniatura – Mini-MCV	DNER – ME 258/94
Método da Pastilha para Identificação Expedita do Grupo MCT	LENC 1997

Para realização dos ensaios do método da pastilha (identificação expedita MCT), além da metodologia apresentada na Tabela 3.1, foi utilizado o procedimento indicado por Nogami e Villibor (1994), nomeado Método de Identificação Expedita (4ª aproximação). Todos os ensaios da Metodologia MCT foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU.

3.2.3 Caracterização Química

O conhecimento da composição química dos solos representa uma importante contribuição para entender o comportamento dos solos quando se trata da sua capacidade em conduzir corrente elétrica, portanto com o objetivo de conhecer a composição química do solo utilizado nesta pesquisa foi realizada a análise química do mesmo. A análise química foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos SOLOQUÍMICA, sendo determinados os teores de ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), alumínio (Al), fósforo (P), carbono orgânico (C), matéria orgânica (MO), pH em água, pH em KCl, capacidade de troca catiônica (valor T ou CTC), soma dos cátions trocáveis (valor S), saturação de alumínio (%Al) e saturação de bases (%V).

A caracterização química dos solos é prática comum na agronomia, portanto os ensaios foram realizados segundo normas da EMBRAPA (1997). Os solos foram previamente secos ao ar e passados na peneira N°10 (2,0 mm), este processo é denominado na agronomia como TFSA (terra fina seca ao ar).

3.2.4 Caracterização Mineralógica – Difração de Raios-X

A técnica de difratometria de raios-X consiste em determinar as distâncias mantidas pelos íons ou átomos formadores dos cristais (distâncias interplanares), através do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de raios-X incidente e o plano atômico que o difrata e, do comprimento de onda desses raios. Esta técnica foi utilizada com o objetivo de identificar os minerais constituintes do solo objeto desta pesquisa.

O limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes que ocorram na amostra abaixo deste limite provavelmente não são captados, ou o são como traço. As análises apresentadas neste trabalho foram realizadas utilizando os procedimentos do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A. apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Relação das metodologias utilizadas na difratometria de raios-X.

Descrição	Metodologia
Operação do Difrátômetro de Raios-X	Procedimento 4.15.03
Preparação de Amostras para Difratometria de Raios-X	Procedimento 4.15.04
Análise por Difração de Raios-X	Procedimento 4.15.11

As amostras foram secas ao ar e passadas na peneira Nº 40 (0,42 mm). Após isso foram submetidas a uma moagem prévia em moinho orbital até sua total moagem (100% passante na peneira 325 mesh) para obter um material representativo de granulação bem fina.

Para análise pelo método do pó não-orientado (amostra integral), parte da amostra foi colocada em um suporte plástico com o auxílio de espátula metálica e levada ao difratômetro de raios-X.

Para análise pelo método orientado procedeu-se à separação da fração argila destas amostras, por sedimentação em coluna, seguida por montagem em vidro de 3 lâminas orientadas para cada material, ou seja, apenas fazendo-se o deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a “lama” para orientação.

Nestas lâminas fez-se uma análise ao natural, uma após glicolagem e outra após calcinação. A glicolagem ocorreu em dessecador, colocado sobre chapa aquecida a 50°C, por 12 horas, para garantir a completa saturação da atmosfera interna com etileno-glicol e assim, promover a expansão da esmectita, caso exista. Após a retirada das amostras do dessecador, as mesmas foram levadas imediatamente ao difratômetro de raios-X para análise. A calcinação da “fração argila” foi efetuada a 550°C e serve para indicar a presença de minerais que passam por colapso de sua estrutura nestas condições (caulinita, gibbsita, etc.).

3.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU. Estes ensaios foram realizados seguindo as especificações constantes na NBR 7182 (ABNT, 1986 b). Utilizou-se as energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada em cilindro de 6” de diâmetro (volume de 2085 cm³ – diâmetro de 152 mm e altura de 114 mm). A Figura 3.4 apresenta o cilindro e o equipamento utilizado no processo de compactação.

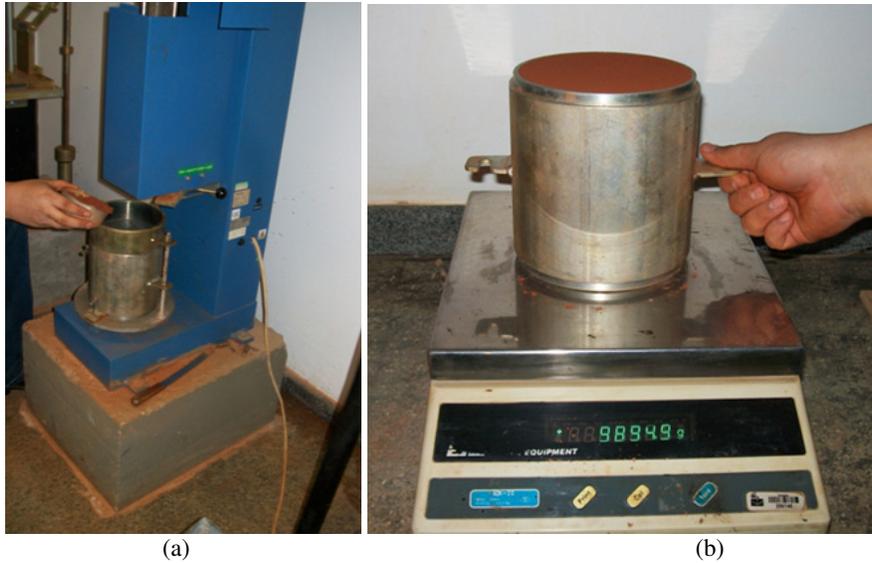


Figura 3.4 Compactação dos corpos de prova: a) compactador mecânico, b) corpo de prova compactado.

Antes da realização de cada ensaio, as amostras foram preparadas conforme prescrições da NBR 6457 (ABNT, 1986 a), sendo estimada uma amostra para cada corpo de prova (compactação sem reuso). Destaca-se, porém, que tais amostras não foram secas ao ar até atingirem a umidade higroscópica, tendo em vista que, segundo diversos autores, destacando-se Aquino *et al.* (2009), Pessoa *et al.* (2005) e Roseno e Camapum de Carvalho (2007), a pré-secagem afeta a estabilidade estrutural dos agregados presentes nos solos tropicais intemperizados, intervindo diretamente na textura e nos resultados de compactação. Buscando-se então um resultado mais próximo do que seria a compactação em campo, foi realizada a compactação no laboratório sem o processo de pré-secagem do material. Quando necessário, as amostras compactadas foram secas à sombra, até atingirem a umidade desejada. Acrescentou-se, quando necessário, água às amostras dos demais pontos e as mesmas foram deixadas em repouso por cerca de 24 horas antes da compactação (Figura 3.5).



Figura 3.5 Amostras preparadas em repouso.

Visando a obtenção da resistividade elétrica do solo em diferentes condições de compactação e umidade, foram moldados 20 corpos de prova distribuídos nas três curvas de compactação referentes às energias Proctor normal, intermediário e modificado, sendo 7 corpos de prova na energia Proctor normal, 7 corpos de prova na energia Proctor intermediário e 6 corpos de prova na energia Proctor modificado.

A moldagem foi realizada a partir de uma umidade ótima presumível na energia de compactação Proctor normal e a partir deste ponto definiu-se os demais pontos de compactação, sendo para a energia normal uma variação de $\pm 2\%$ em relação a cada ponto de umidade. A partir da curva de compactação correspondente à energia normal, estimou-se os demais pontos para as curvas correspondentes à energia intermediária e modificada, partindo-se sempre do ponto de umidade ótima e variando-se a umidade de forma que se obtivessem na malha alguns pontos de mesmo índice de vazios e umidades diferentes (Figura 3.6). É importante destacar que a água adicionada às amostras para compactação dos corpos de prova foi a água de abastecimento urbano.

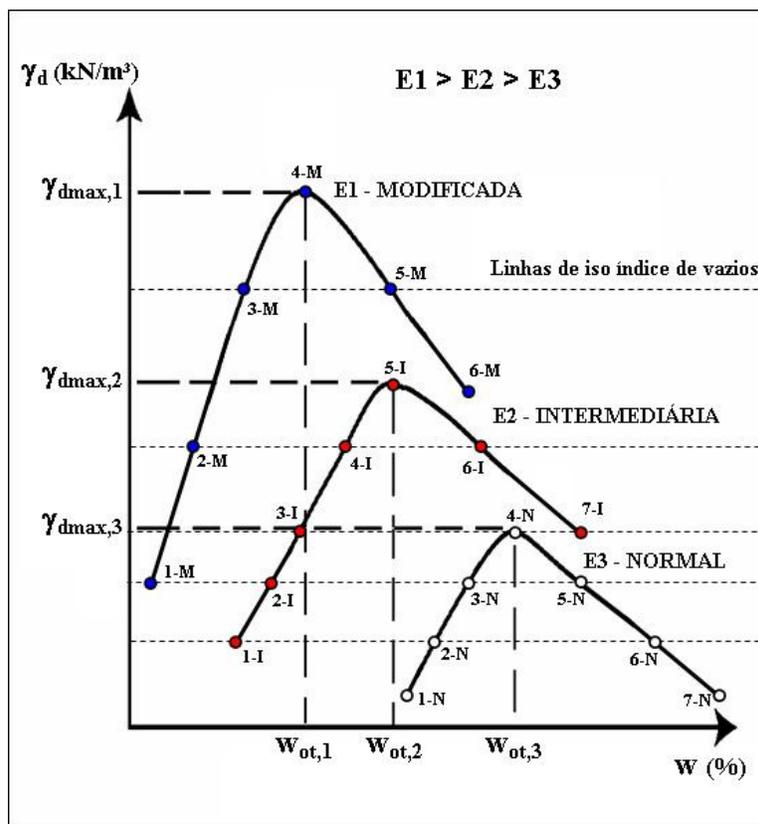


Figura 3.6 Malha de pontos a ser obtida nos ensaios de compactação.

3.3.1 Estudo da Condutividade Elétrica da Água

A composição química da água é um dos fatores que afetam a resistividade elétrica do solo. Sendo assim, foi realizado nesta pesquisa um estudo breve sobre a condutividade elétrica da água utilizada, comparando-a com águas em diferentes salinidades. Buscando, como objetivo principal, o entendimento de como a condutividade elétrica da água se comporta frente à variação de sua salinidade e como a resistividade elétrica do solo se altera com a mudança da salinidade da água utilizada na compactação.

Para isso foram preparadas cinco soluções com salinidade diferentes a partir da água padrão em estudo, ou seja, a água de abastecimento. As salinidades foram definidas de forma a cobrir uma faixa de valores capaz de identificar solos contaminados com soluções salinas e a preparação da água se deu pela dissolução de cloreto de sódio na água em quantidade necessária para se atingir a salinidade pretendida. Estas foram de: 0; 0,25; 1,0; 4,0 e 10 g de sal / litro de água de abastecimento.

Após a dissolução do sal nas águas, as soluções foram deixadas em repouso por um período de 24 horas para posterior medida de suas condutividades elétricas. Tendo em vista que o solo utilizado na pesquisa poderia conter sais que em contato com a água de amassamento alterariam sua condutividade elétrica, para cada uma das cinco soluções em diferentes salinidades, preparou-se uma mistura da solução salina, em cada uma das concentrações, mais solo em uma proporção de 1 ml de solo para 2 ml de água. Essas misturas também ficaram em repouso por um período de 24 horas antes de se medir a condutividade elétrica das mesmas.

Para realização das medidas de condutividade elétrica foi utilizada uma sonda digital da marca YSI com capacidade de medir de 0 até 200,0 mS/cm com resolução de 0,1 μ S/cm. Foram realizadas durante as mediadas também a aferição da temperatura da água juntamente com seu pH e salinidade (Figura 3.7).



Figura 3.7 Medida de condutividade elétrica da água: a) equipamento, b) medida.

Foram compactados 5 corpos de prova com a mesma umidade, sendo um para cada salinidade. Os dados de compactação foram: o peso específico seco máximo e umidade ótima obtidos na curva de compactação correspondente à energia Proctor normal. As medidas de resistividade elétrica dos corpos de prova foram realizadas seguindo os procedimentos descritos no item 3.4.

3.4 MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

As medidas de resistividade elétrica dos corpos de prova foram efetuadas utilizando-se a técnica de duas pontas ou de dois terminais. A Figura 3.8 esboça o arranjo experimental para este tipo de medida. Esta técnica consiste em medir a corrente elétrica que flui por um sólido quando a ele é imposta uma diferença de potencial (ddp). Assim, conhecendo-se com precisão as dimensões do corpo de prova, pode-se calcular por meio da Equação 3.2 o valor da resistividade elétrica, medindo-se a corrente elétrica que flui através da amostra quando aplicada a essa uma diferença de potencial pré-estabelecida (GIROTTI E SANTOS, 2002).

$$\rho = \frac{V \cdot A}{i \cdot L} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica;

V = diferença de potencial (ddp);

A = área da seção transversal do sólido;

L = comprimento do sólido;

i = corrente elétrica.

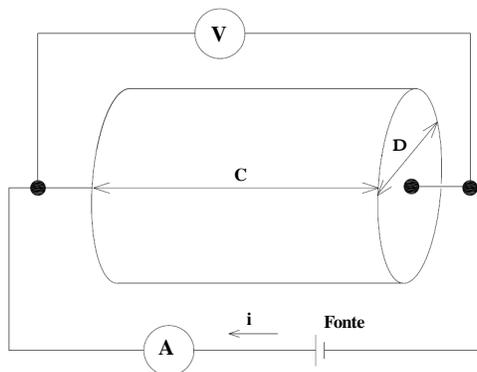


Figura 3.8 Arranjo experimental para o método de duas pontas (GIROTO E SANTOS, 2002 – modificado).

Para possibilitar a utilização deste método na aferição da resistividade elétrica dos corpos de prova compactados, foram confeccionados dois capacetes metálicos em cobre com o mesmo diâmetro dos corpos-de-prova (6", 152 mm). Para a aplicação da diferença de potencial foi utilizada uma fonte de alimentação regulável com capacidade de fornecer de 0 a 30 volts com resolução de 0,1 volts. As leituras de corrente foram realizadas por meio de um amperímetro digital com capacidade de medida de 0 a 10 ampéres com resolução 0,1 micro ampére. A Figura 3.9 apresenta os equipamentos utilizados.

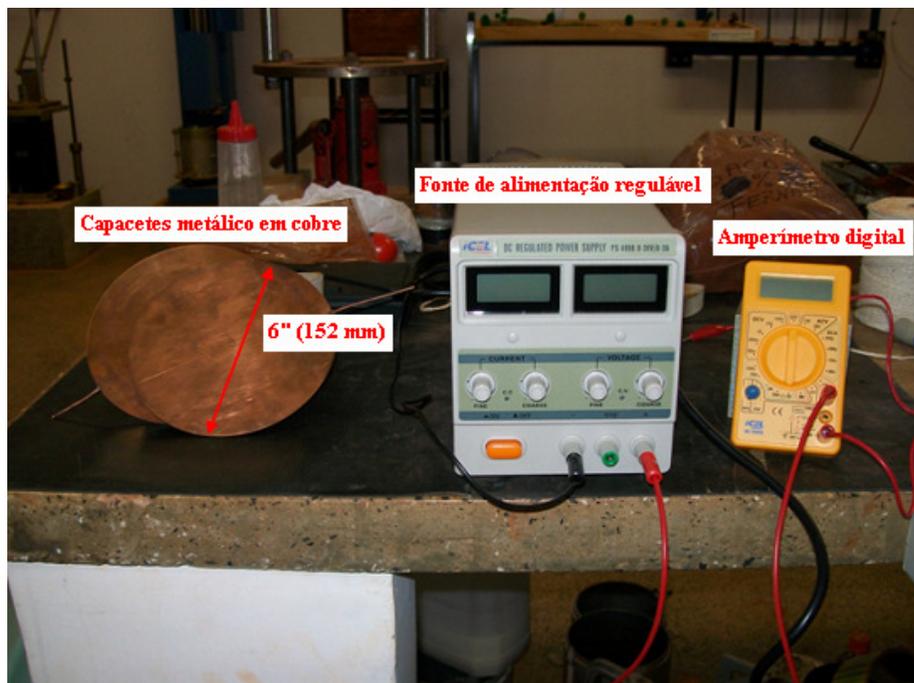


Figura 3.9 Equipamentos utilizados para medida de resistividade elétrica.

Para a realização das medidas, os corpos de prova compactados foram sacados dos cilindros de compactação e colocados em contato com os capacetes metálicos. Devido a possíveis irregularidades presentes nas faces dos corpos de prova, foi utilizada entre os capacetes e as faces dos corpos de prova uma camada de aproximadamente 2 mm de espessura de um gel de alta condutividade elétrica (Figura 3.10), com viscosidade suficiente para não penetrar nos vazios da amostra; garantindo, assim, um perfeito contato entre o capacete metálico e as faces superior e inferior dos corpos de prova (Figura 3.11). O gel utilizado, da marca Mercur, é o mesmo utilizado em procedimentos médicos, tais como, desfibrilação e eletrocardiograma.

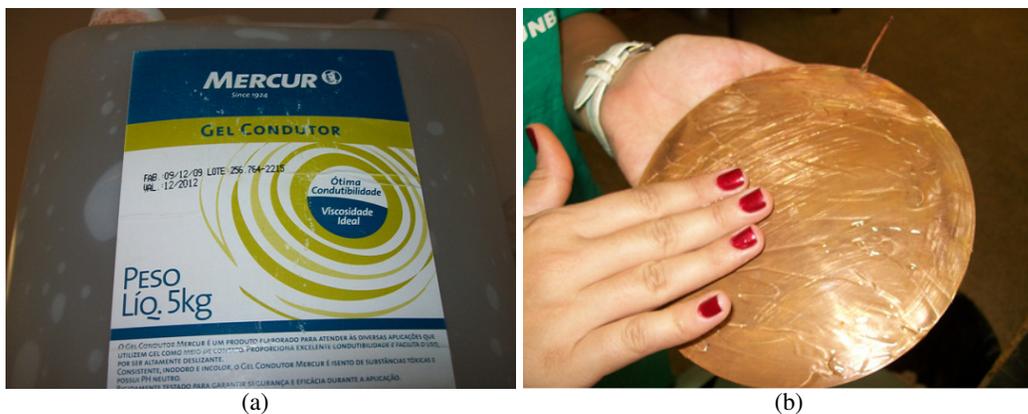


Figura 3.10 Gel condutor: a) embalagem, b) aplicação no capacete metálico.

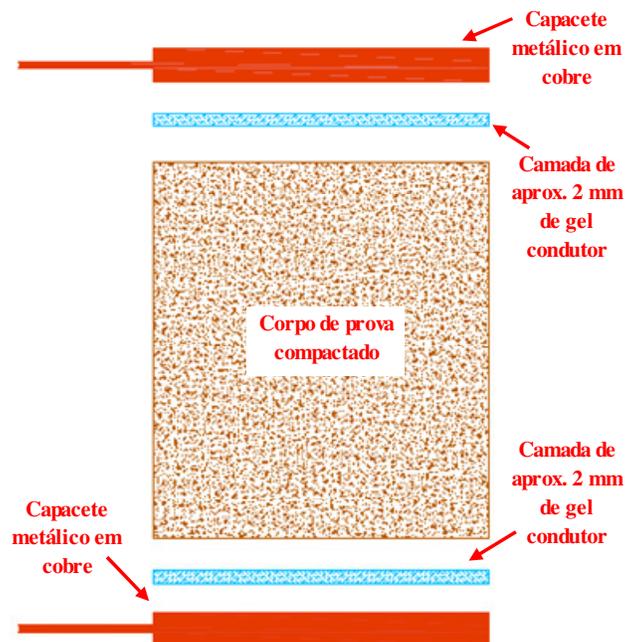


Figura 3.11 Desenho esquemático da preparação do corpo de prova para a medida de resistividade elétrica.

O procedimento de aferição da resistividade elétrica se deu conectando-se aos capacitores metálicos cabos elétricos por meio de terminais tipo jacaré, que permitiram a aplicação da diferença de potencial com o auxílio da fonte de alimentação. A medida da corrente elétrica foi realizada com o auxílio do amperímetro digital, sendo este ligado em série com a fonte de alimentação (Figura 3.12). Sobre o capacitor metálico superior colocou-se sobrecargas garantindo o espalhamento adequado do gel em toda a superfície do corpo de prova. Manteve-se em todos os corpos de prova uma sobrecarga padrão de 4.540 gramas.

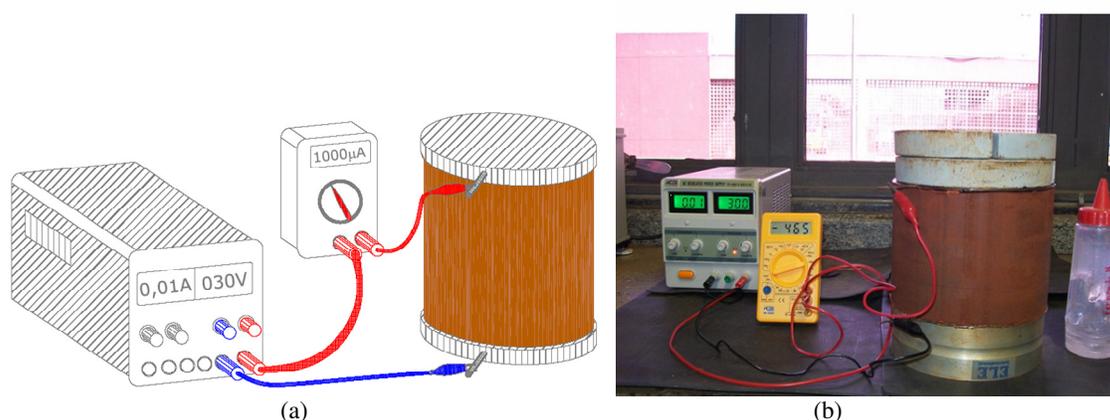


Figura 3.12 Sistema para medidas da resistividade elétrica: a) desenho esquemático da montagem, b) imagem da realização das medidas.

Visando avaliar o comportamento da resistência elétrica (relação entre diferença de potencial e corrente elétrica), as medidas de resistividade elétrica dos corpos de prova foram realizadas aplicando a eles diferentes valores de ddp. Com isso foi possível avaliar, se para o material em estudo, a relação tensão - corrente elétrica apresentava um comportamento linear, ou seja, se o material obedeceria ao modelo de comportamento proposto pela Lei de Ohm. Foram aplicados, então, em cada corpo de prova os seguintes valores de ddp: 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 25 e 30 volts. Cabe destacar que as medidas foram realizadas em uma sala climatizada com temperatura controlada a 25 °C.

Após as medidas de resistividade elétrica, cada corpo de prova foi dividido em 5 partes iguais, sendo duas delas destinadas ao processo de secagem e umedecimento e as demais aos ensaios de módulo de resiliência, mini-CBR e compressão simples (Figura 3.13).

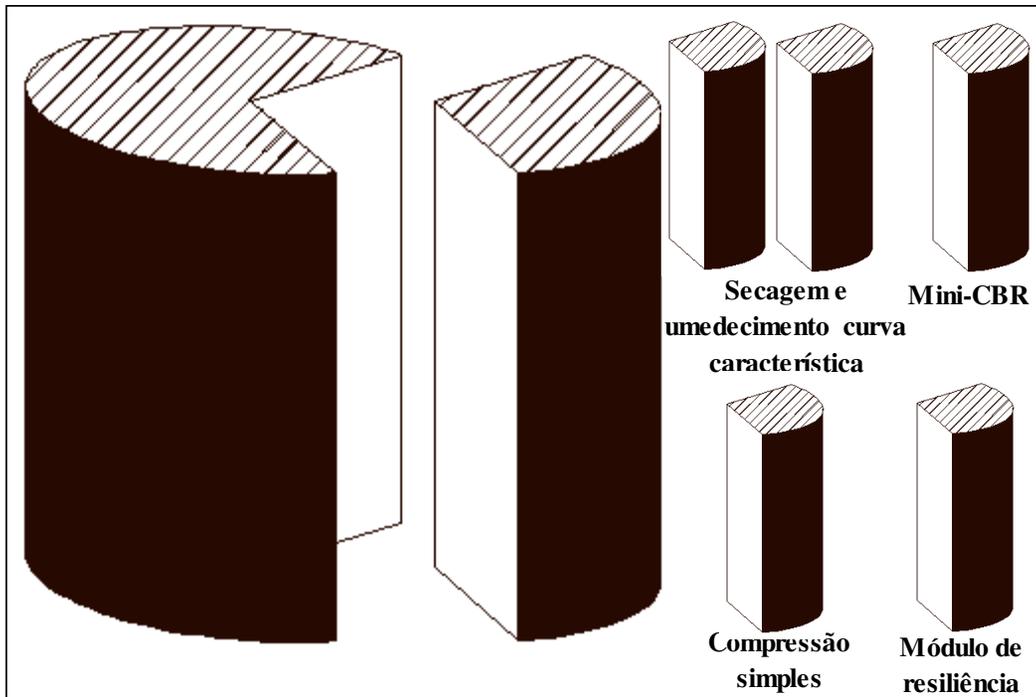


Figura 3.13 Esquema de divisão do corpo de prova de 6".

3.5 PROCESSO DE SECAGEM E UMEDECIMENTO E OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

O processo de secagem e umedecimento dos corpos de prova foi realizado com o intuito de avaliar o comportamento da resistividade elétrica do material compactado frente às trajetórias de secagem e umedecimento. Buscou-se, também com esse processo, obter um maior número de pontos de densidade – umidade – resistividade elétrica, auxiliando, assim, nas análises comparativas propostas no objetivo desta dissertação.

Para tal, foram moldados 8 corpos de prova de aproximadamente 20 mm de altura por 50 mm de diâmetro por meio da cravação de gabaritos de PVC nas amostras compactadas em cilindro de 6" (Figura 3.14 a). Para facilitar o manuseio e a execução do ensaio, os corpos de prova foram retirados dos gabaritos de PVC (Figura 3.14 b).



Figura 3.14 Moldagem dos corpos de prova para secagem e umedecimento: a) cravação do cilindro de PVC, b) desmoldagem dos corpos de prova do cilindro de PVC.

Em paralelo a esse processo, utilizando-se os mesmos 8 corpos de prova, foram realizadas medidas de sucção matricial pela técnica do papel filtro e obtendo-se, assim, a curva característica do material em cada condição de compactação. Essas medidas tiveram por objetivo auxiliar nas análises dos ensaios mecânicos, que foram realizados em corpos de prova não saturados, e, também, partindo do princípio que a resistividade elétrica e a sucção matricial são dependentes da quantidade de água no solo, realizar um estudo comparativo entre estes dois parâmetros.

3.5.1 Papel Filtro

O papel filtro utilizado foi o Whatman N° 42. A ASTM D 5298 (2003) prescreve que o papel filtro deve ser seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso e guardado em um dessecador até o momento de utilização. Segundo Marinho (1995) existem discussões sobre este procedimento, visto que ele pode alterar as características de absorção do papel filtro. Marinho (1995) aconselha a utilização do papel filtro diretamente da caixa. Nestes ensaios, foi utilizado o procedimento descrito por Marinho (1995).

Para a obtenção da curva característica, os 8 corpos de prova foram moldados com um teor de umidade conhecido e a partir dele, alguns corpos de prova foram secos ao ar (Figura 3.15 a) e outros umedecidos por gotejamento (Figura 3.15 b).

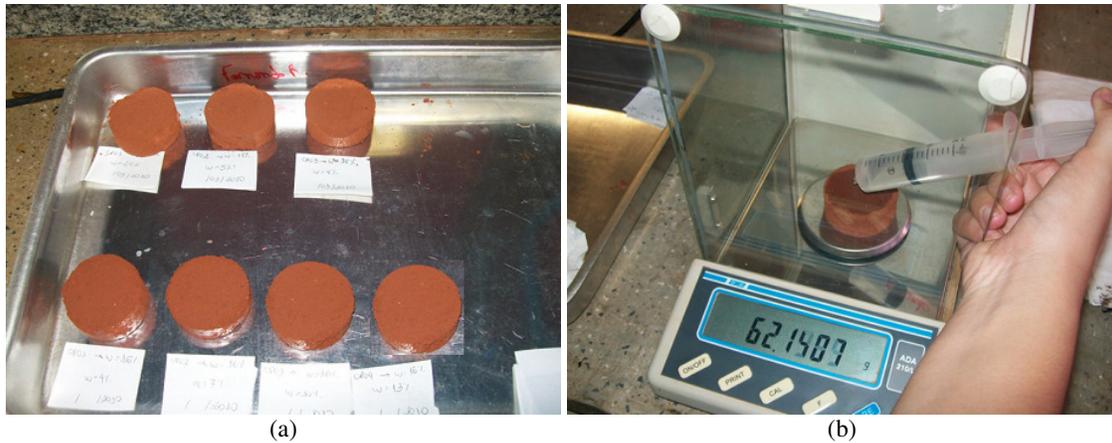


Figura 3.15 Preparação dos corpos de prova para ensaio de papel filtro: a) secagem ao ar, b) umedecimento por gotejamento.

Quando os corpos de prova atingiram as condições desejadas, foram colocados três papéis filtro, sendo um deles em contato direto com o solo, para medir a sucção matricial (Figura 3.16).

Cada corpo de prova foi pesado antes da colocação dos papéis filtro. Após a pesagem e colocação dos papéis filtro, cada corpo de prova foi envolto com duas camadas de filme plástico e uma camada de papel alumínio, posteriormente identificado e colocado em uma caixa de isopor que permaneceu lacrada por um tempo de equilíbrio mínimo de 15 dias.

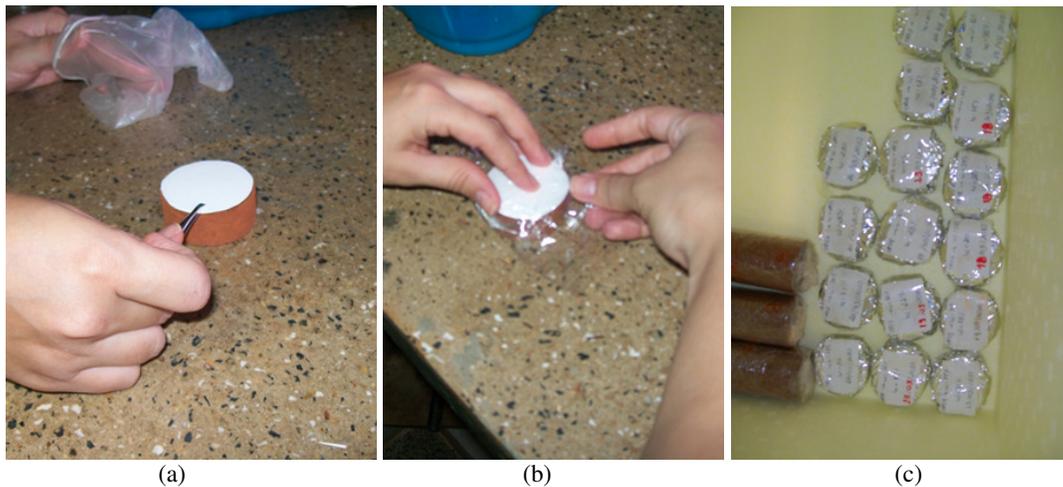


Figura 3.16 Montagem do ensaio com papel filtro: a) colocação do papel filtro, b) fechamento com filme plástico, c) colocação dos corpos de prova na caixa de térmica.

Após o equilíbrio, os papéis filtro foram removidos com o uso de uma pinça e pesados em balança com sensibilidade de leitura de 0,0005 g.

Posteriormente, o papel filtro foi seco em estufa (105 a 110 °C) e foi obtida a umidade. Com a umidade do papel e as curvas de calibração, obteve-se a sucção utilizando-se as Equações 3.3 (para umidades do papel filtro maiores que 47%) e 3.4 (para umidades do papel filtro menores ou iguais a 47%) propostas por Chandler *et al.* (1992) *apud* Pereira e Marinho (1998) para o papel filtro utilizado.

$$Sucção(kPa) = 10^{(6,05-2,48\log w)} \quad (3.3)$$

$$Sucção(kPa) = 10^{(4,84-0,0622\log w)} \quad (3.4)$$

Onde:

w = umidade do papel filtro.

Após a pesagem dos papéis filtro, fez-se a medida de resistividade elétrica com os oito corpos de prova. Fez-se também o ensaio de resistência à tração por compressão diametral com o corpo de prova correspondente à umidade de compactação. Posteriormente, realizou-se o ensaio de densidade pelo método da balança hidrostática e cada corpo de prova foi dividido em três partes para a determinação da umidade.

3.5.2 Medida de Resistividade Elétrica

A medida de resistividade elétrica foi realizada seguindo o procedimento descrito no item 3.4. Os equipamentos utilizados foram os mesmos, exceto o capacete metálico, que para este caso possui diâmetro de aproximadamente 2” (51 mm). Foram aplicados em cada corpo de prova os seguintes valores de ddp: 10, 15, 20, 25 e 30 volts.

Antes da realização das medidas de resistividade foram aferidas as dimensões (altura e diâmetro) dos corpos de prova, com o auxílio de um paquímetro. A Figura 3.17 ilustra o processo do ensaio.

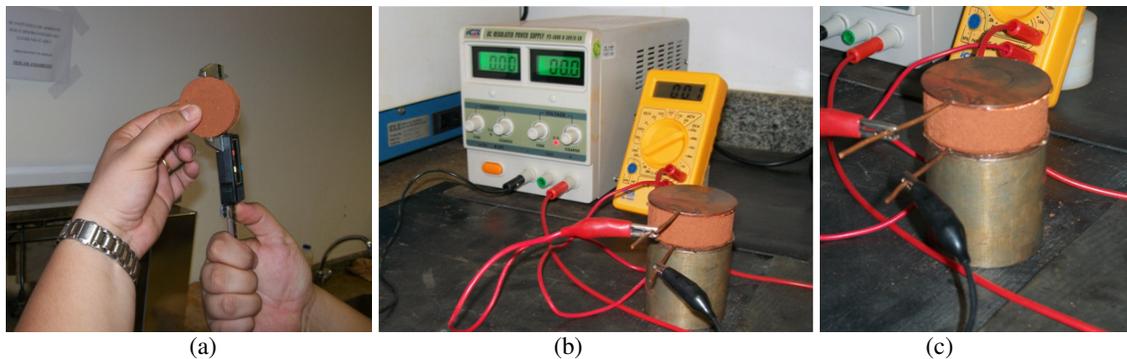


Figura 3.17 Medidas de resistividade elétrica: a) aferição das medidas com paquímetro, b) execução do ensaio, c) detalhe do corpo de prova.

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

3.6.1 Módulo de Resiliência

Objetivando-se analisar as características de deformabilidade da amostra em estudo, em sua condição compactada em diferentes condições de compactação e umidade, foram realizados ensaios de cargas repetidas em aparato triaxial cíclico.

O ensaio de carga repetida, também chamado de triaxial cíclico consiste basicamente na aplicação de uma força que atua sempre no mesmo sentido de compressão, aumentando de zero a um máximo e depois diminuindo até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso. Este procedimento procura reproduzir as condições imposta pelo tráfego à estrutura de pavimento. Segundo Medina e Motta (2005) a amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade de tráfego do veículo na pista e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas. Já a frequência do pulso representa o fluxo de veículos que trafega na pista.

Os ensaios triaxiais cíclicos possuem seu procedimento de execução descrito pelas normas: DNER-ME 131/94 – Solo determinação do módulo de resiliência e AASHTO 307/1999 – Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Ambos os procedimentos dividem a execução do ensaio em duas etapas.

A primeira delas, chamada fase de condicionamento, objetiva eliminar ou minimizar os efeitos das deformações plásticas e da história de tensões no valor do módulo de resiliência. É, na verdade, uma sequência de carregamentos dinâmicos que permite dotar o material de uma condição de pré-adensamento (FERREIRA, 2002). A determinação dos valores de Módulo de Resiliência (M_R) dos materiais é objeto da segunda parte do ensaio,

onde para cada par de tensões σ_1 (tensão principal maior) e σ_3 (tensão confinante) aplicado medem-se as deformações resilientes.

De acordo com estas normas, a realização do ensaio cíclico, deve ser antecedida por uma caracterização do solo, visto que a granulometria e a aplicabilidade deste solo são fatores preponderante no procedimento a ser seguido.

Tendo em vista que o solo estudado é um solo típico da região do Distrito Federal, ou seja, um solo tipicamente fino, e sua aplicação está direcionada a subleito e ou reforço de subleito, a norma do ensaio prescreve que a partir da montagem do aparato triaxial, o ensaio para a determinação do módulo de resiliência deve se iniciar com o condicionamento do corpo de prova. Para este condicionamento, foi aplicada a amostra uma tensão confinante igual a 42 kPa. Posteriormente, foram aplicados 500 ciclos de tensão desvio, sendo esta igual a 28 kPa, a uma frequência de 60 ciclos por minuto e duração do ciclo igual a 1,0 segundo (duração do pulso de 0,1 segundo e intervalo entre um pulso e outro de 0,9 segundos).

A próxima fase do ensaio compreende o registro das deformações, sendo esta dividida em 15 sequências (3 diferentes tensões confinantes com 5 tensões desvios em cada tensão confinante). Nesta fase, a tensão confinante na amostra é mantida constante e igual a 42 kPa sendo aplicada a amostra, em cada sequência, uma tensão desvio igual a 14, 28, 42, 55, e 69 kPa, num total de 100 ciclos. O seguimento do ensaio se dá variando-se a tensão confinante em 28 e 14 kPa. A deformação resiliente da amostra e o respectivo módulo de resiliência são determinados, para cada tensão desvio, após o término da aplicação dos ciclos de carregamento vertical (Equações 3.5 e 3.6).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad (3.5)$$

Onde:

M_R = módulo de resiliência;

σ_d = tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$);

ε_1 ou ε_r = deformação resiliente (recuperável) axial do corpo de prova.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3.6)$$

Onde:

Δh = deslocamento vertical máximo;

h_0 = comprimento inicial de referência do corpo de prova ensaiado.

O aparato triaxial cíclico utilizado para determinação dos módulos de resiliência do solo em estudo está instalado no Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU (Figura 3.18).

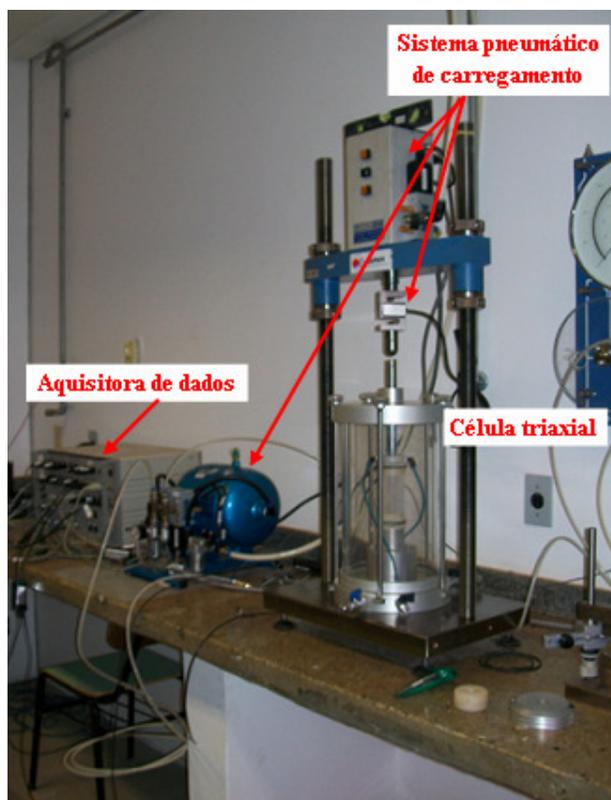


Figura 3.18 Aparato triaxial cíclico – Laboratório de Engenharia Rodoviária – CEFTRU.

O equipamento compõe-se basicamente de uma célula triaxial, um sistema pneumático de carregamento e um moderno sistema de controle e aquisição de dados, o qual é diretamente ligado a um computador. O computador, por meio de software específico, permite que o usuário entre com as condições iniciais do ensaio e acompanhe sua evolução. Para a medida de deformações resilientes, o equipamento conta ainda com um par de transdutores de deslocamentos (LVDT), os quais são acoplados ao pistão responsável pela aplicação da força vertical axial ao corpo de prova.

Os corpos de prova submetidos aos ensaios Triaxiais Cíclicos foram obtidos a partir das amostras compactados dinamicamente em cilindro de 6". Os corpos-de-prova foram torneados até atingirem aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com o topo do corpo de prova paralelo ao topo da amostra compactada (Figura 3.19).

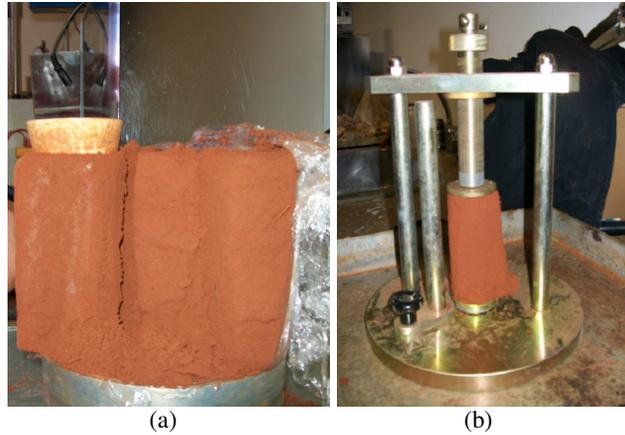


Figura 3.19 Preparação dos corpos de prova para ensaio triaxial cíclico: a) retirada da amostra do corpo de prova de 6”, b) torno.

Antes da execução do ensaio triaxial os corpos de prova tinham suas dimensões e sua umidade aferidas e também era realizada a medida da resistividade elétrica do corpo de prova pelo mesmo procedimento descrito no item 3.4 (Figura 3.20).



Figura 3.20 Preparação dos corpos de prova para ensaio triaxial cíclico: a) aferição de dimensões, b) medida de resistividade elétrica.

3.6.2 Mini - CBR

Para a realização do ensaio de mini-CBR foram utilizados os procedimentos e equipamentos descritos na norma DNER ME 254/94. Os ensaios foram realizados com os corpos de prova na condição da umidade de compactação, sem a utilização de sobrecarga.

Os corpos de prova para a realização dos ensaios foram obtidos por cravação de um cilindro metálico biselado no corpo de prova de 6” (152 mm) de diâmetro. Este cilindro

metálico possui aproximadamente 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro e foi cravado até se conseguir um corpo de prova de 50 mm de altura por 50 mm de diâmetro (Figura 3.21).



Figura 3.21 Ensaio de mini-CBR: a) cravação do cilindro metálico, b) penetração do pistão.

A velocidade de penetração do pistão nos corpos de prova foi de 1,25 mm/min. As leituras da carga aplicada foram efetuadas quando corresponderam às penetrações de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 mm. Após a realização das leituras, nos ensaios, os corpos de prova foram retirados do molde para a determinação do teor de umidade.

3.6.3 Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram executados com o objetivo de determinar a resistência à compressão do solo. A escolha deste ensaio está associada a sua facilidade e praticidade de execução e a possibilidade de se realizar medidas de resistividade elétrica no decorrer da ruptura (Figura 3.22), utilizando-se basicamente um aparato similar ao apresentado no item 3.5.2.

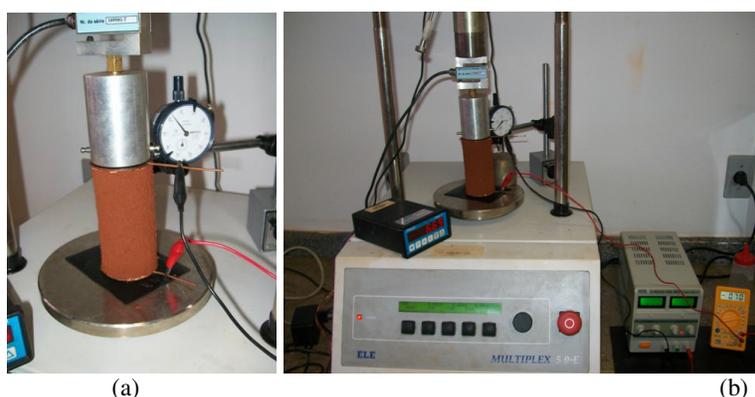


Figura 3.22 Ensaio de compressão simples com medida de resistividade elétrica: a) corpo de prova durante o ensaio, b) equipamento completo.

Os ensaios de compressão simples foram realizados utilizando-se corpos de prova de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro, obtidos a partir das amostras compactadas dinamicamente em cilindro de 6", seguindo-se os mesmos procedimentos descritos no item 3.6.1. A velocidade de ruptura adotada foi de 0,8 mm/min em uma prensa automática.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Neste item são apresentados os resultados das caracterizações e as classificações realizadas com a utilização dos dados obtidos. Os ensaios foram realizados para o solo em estudo e foram aplicadas as metodologias descritas no Capítulo 3.

Destaca-se que todos os ensaios de caracterização foram realizados com as amostras secas ao ar. Sendo realizada uma análise granulométrica complementar com a amostra na umidade natural de campo, com o intuito de avaliar a estabilidade estrutural dos agregados do solo frente ao processo de secagem.

4.1.1 Caracterização Geotécnica

Com objetivo de verificar a variação do peso específico dos grãos com a variação do tamanho das partículas, foram realizados ensaios de peso específico dos grãos com diferentes diâmetros. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos neste ensaio, onde pode-se verificar que a dimensão dos grãos, que passam ou ficam retidos na peneira N° 40, tem pouca influência no peso específico dos grãos, apontando que a mineralogia destes não apresenta grande variação.

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de peso específico dos grãos - solo Noroeste

Amostra	Peso Específico dos Grãos - γ_s (kN/m ³)
γ_s - Passado na # 40	26,58
γ_s - Passado na # 4 e retido na # 40	26,48
γ_s - Média	26,53

Os resultados das análises granulométricas realizadas com e sem o uso de defloculante para o solo Noroeste ensaiado, após secagem prévia (Tabela 4.2 e Figura 4.1), mostram uma considerável alteração das classificações granulométricas quando considerados os resultados oriundos dos dois métodos. Nesse solo a fração argila apresenta-se agregada na fração areia. Verifica-se que esse solo, profundamente intemperizado, encontra-se em estado agregado, e sua desagregação também pode ocorrer com o emprego de uma energia mecânica como, por exemplo, o processo de lavagem na peneira N° 200.

Guimarães (2002), estudando um perfil de solo do Distrito Federal concluiu que a granulometria está associada ao processo de alteração, sendo que as maiores diferenças entre as curvas granulométricas obtidas nos ensaios realizados com e sem defloculante ocorrem para os solos com maior concentração de hidróxidos de alumínio (gibbsite), ou seja, a agregação é maior quanto maior é o grau de intemperização da amostra. Verificou-se esta característica na amostra estudada, pois a amostra apresenta um alto grau de agregação e tem a gibbsite como mineral principal.

Tabela 4.2 Resultados da análise granulométrica da amostra.

Fração Granulométrica		Com Secagem	Sem Secagem
Com defloculante	Pedregulho (%)	0,1	0,1
	Areia (%)	59,1	64,1
	Silte (%)	5,5	4,9
	Argila (%)	35,3	30,9
Sem defloculante	Pedregulho (%)	0,1	0,1
	Areia (%)	91,7	96,9
	Silte (%)	7,1	1,9
	Argila (%)	1,1	1,1

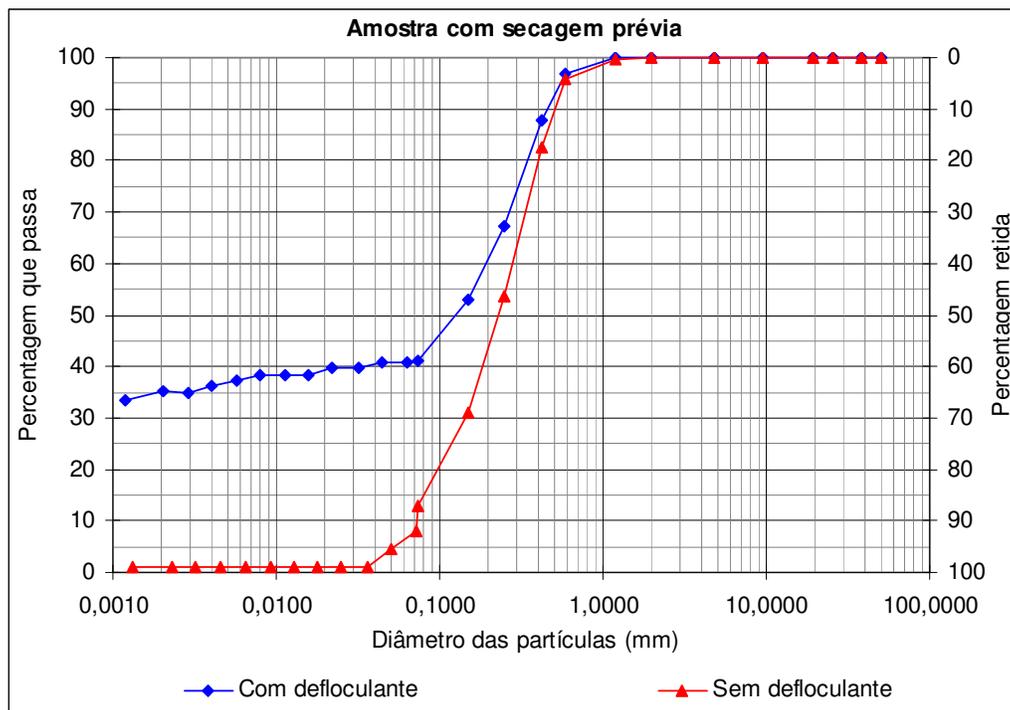


Figura 4.1 Curvas granulométricas - solo Noroeste com secagem prévia.

A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas da amostra do solo Noroeste, na umidade natural, para os ensaios realizados com e sem defloculante. É importante destacar

que na Figura 4.1 o defloculante só promove a desagregação para as partículas menores que 0,42 mm, pois até este ponto as curvas com e sem defloculante estão praticamente sobrepostas. No entanto, este fato não indica a ausência de agregações para as partículas maiores que 0,42 mm, visto que na Figura 4.2 as curvas não seguem sobrepostas e o efeito do defloculante é mais perceptível até os maiores tamanho de grãos presentes na amostra. Portanto, a sobreposição das curvas na Figura 4.1 pode estar relacionada à desagregação promovida pelo processo de secagem do material, que é evidenciado na Figura 4.3.

Na Tabela 4.1 fica evidente a ocorrência da desagregação promovida pela secagem prévia do material, podendo-se observar claramente, para os resultados sem defloculante, a desagregação da fração areia em fração silte, na amostra com secagem prévia, quando comparada à amostra na umidade natural.

Em uma análise conjunta com os resultados de mineralogia, verifica-se que esta indica uma grande variedade de argilominerais, o que aponta para uma possível variedade dos argilominerais presentes nos agregados do solo, além da possibilidade de presença do quartzo. Assim, possuindo estes argilominerais diferentes coeficientes de dilatação, a desagregação das amostras com a pré-secagem se explica, visto que, ao se dilatarem diferentemente com o aumento da temperatura os argilominerais promovem trincamentos localizados e a quebra das agregações.

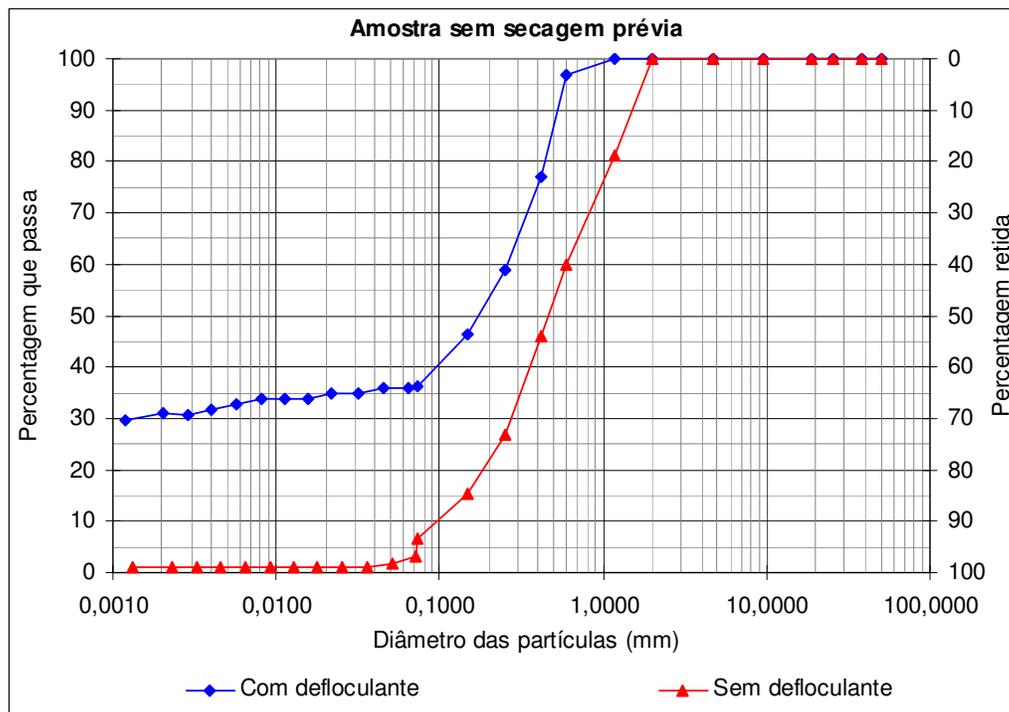


Figura 4.2 Curvas granulométricas - solo Noroeste sem secagem prévia.

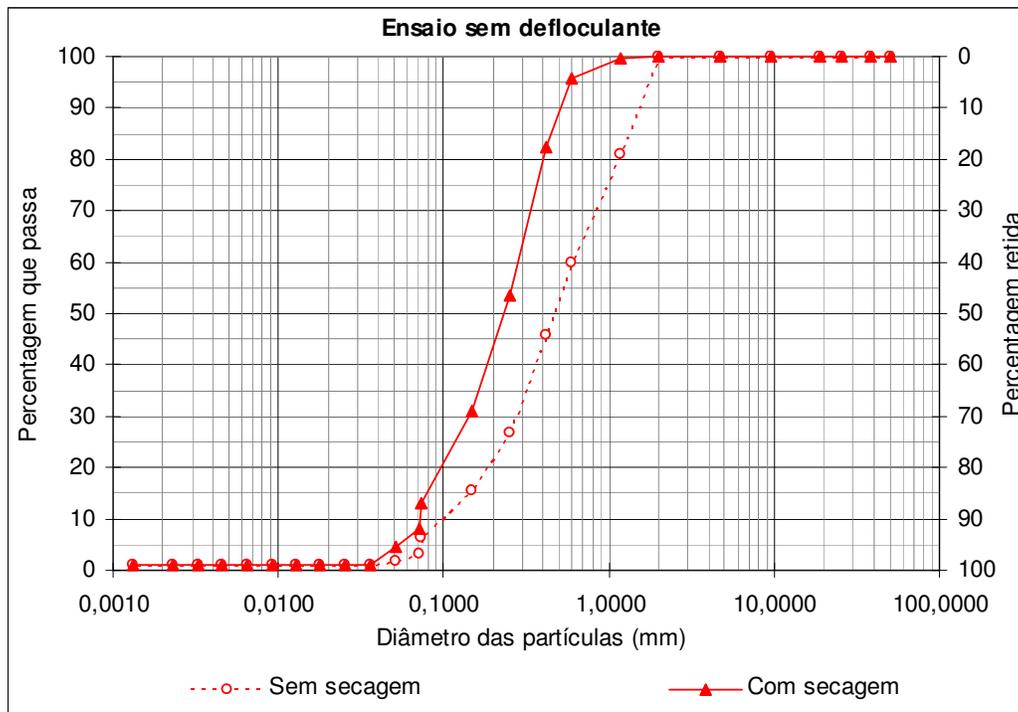


Figura 4.3 Curvas granulométricas - solo Noroeste sem defloculante.

Os resultados apresentados aqui mostram que a pré-secagem afeta a estabilidade estrutural dos agregados presentes no solo, intervindo diretamente na textura, o que consequentemente afetaria os resultados de compactação e a própria resistividade. Estes resultados são, do ponto de vista prático, bastante importantes para o entendimento do comportamento do solo estudado, visto que as análises realizadas demonstram que, em campo, se adotada como referência a curva de compactação obtida com pré-secagem do solo, pode-se no processo de compactação não se alcançar as condições ideais de umidade e peso específico aparente seco estabelecidas em projeto. Este fato é importante, tendo em vista que no processo de compactação de corpos de prova em laboratório (reconstituição do que é ou será no campo), pequenas variações de peso específico e umidade podem afetar em proporções inaceitáveis os resultados para um estudo paramétrico em termos de deformação e fluxo, por exemplo.

Diante do que foi exposto, destaca-se a importância da não realização do processo de secagem da amostra antes do ensaio de compactação, visto que fica evidente que a diminuição acentuada da umidade afeta a estabilidade estrutural das agregações. Devido a este fato, como já destacado no Capítulo 3, nesta pesquisa optou-se pela realização dos ensaios de compactação sem submeter a amostra a secagem até a sua umidade higroscópica.

A Figura 4.4 apresenta a carta de plasticidade onde se pode verificar que a amostra do solo Noroeste apresentou baixo índice de atividade ($I_a < 0,8$). Analisando características de diversos solos tropicais, Sória (1986) concluiu que: atividade $> 0,8$ implica em solos não lateríticos, sendo solos lateríticos aqueles que apresentam atividade menor que 0,8. As observações realizadas pelo autor são válidas para a amostra estudada, pois a mesma possui características lateríticas e apresentou $I_a = 0,27$, portanto $I_a < 0,8$.

Neste mesmo estudo, o autor concluiu, em relação à mineralogia, que: atividade $> 0,8$ implica em solos com teores apreciáveis de argilominerais ativos. Comparando os valores de atividade com os minerais identificados na difração de raios-x (Tabela 4.6 – item 4.1.4) verifica-se que estas asserções são válidas para a amostra estudada, ou seja, a baixa atividade do solo Noroeste está ligada a presença predominante de argilominerais 1:1 (caulinita), gibsitita e quartzo.

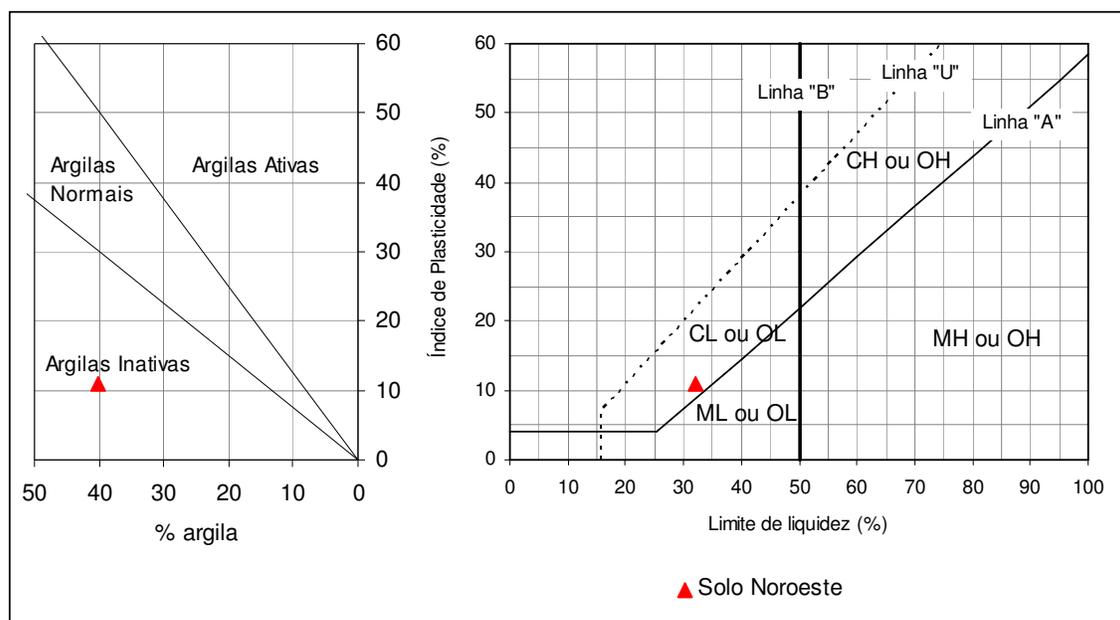


Figura 4.4 Carta de plasticidade.

Para a amostra estudada, verificou-se que a classificação utilizando-se as granulometrias com ou sem defloculante influenciaram no resultado (Tabela 4.3), pois há variação significativa na granulometria com e sem defloculante no material retido na peneira #200 (0,074 mm). Analisando as classificações apresentadas na Tabela 4.3 verifica-se que:

a) o solo Noroeste, com os valores obtidos na granulometria com secagem previa e com defloculante, é classificado pelos sistemas SUCS e TRB como areia argilosa e solos argilosos, respectivamente. Os dois sistemas apresentaram classificações semelhantes (solos

argilosos), refletindo, assim, a granulometria do material com predomínio de areia e argila, e características tátil-visuais que determinam um comportamento argiloso.

b) o solo Noroeste, com os valores obtidos na granulometria com secagem previa e sem defloculante, é classificado pelos sistemas SUCS e TRB como areia bem graduada e areia argilosa, respectivamente. Os dois sistemas apresentaram classificações semelhantes (areia), refletindo o alto grau de agregação da amostra.

Tabela 4.3 Resultados da caracterização e classificação da amostra.

Amostra		Solo Noroeste
Umidade natural de campo (%)		17,7
Limite de liquidez (%)		32
Limite de plasticidade (%)		21
Índice de plasticidade (%)		11
Índice de atividade ⁽¹⁾		0,27
Classificação SUCS	com defloculante	SC
	sem defloculante	SW
Classificação TRB	com defloculante	A-6
	sem defloculante	A-2-6

OBS: (1) ensaio com defloculante, considerando % menor que 0,02 mm na fração menor que 0,42 mm.

4.1.2 Caracterização MCT

A Tabela 4.4 apresenta os índices e coeficientes utilizados na classificação MCT Tradicional e Expedita, obtidos utilizando os ensaios de compactação Mini-MCV, perda de massa por imersão e método das pastilhas, além do Grupo MCT no qual cada amostra foi classificada.

Tabela 4.4 Resultados dos ensaios da metodologia MCT: classificação tradicional e expedita.

Amostra		Solo Noroeste
Tradicional	c'	1,37
	d'	29,08
	Pi (%)	42,4
	e'	1,04
	Grupo MCT	LA'
	Classificação	Solos Arenosos Lateríticos
Expedita	Consistência	Plástica
	Contração (mm)	1,32
	c'	1,64
	Penetração (mm)	0,0
	Grupo MCT	LA' -LG'
	Classificação	Solos Arenosos Lateríticos - Argilosos Lateríticos

Verificou-se na Tabela 4.4 que a amostra ensaiada apresenta comportamento laterítico. Segundo Nogami e Villibor (1995) o comportamento laterítico começa a se manifestar quando $d' > 20$ e $P_i < 100$ ($e' < 1,15$).

A definição do comportamento laterítico e não laterítico está ligado ao resultado do ensaio de perda de massa por imersão (P_i), sendo que os solos saprolíticos (não lateríticos) apresentam, geralmente, valores de P_i nitidamente superiores aos dos solos de comportamento laterítico (NOGAMI & VILLIBOR, 1995). O valor de P_i pode ser utilizado também na análise do potencial de erodibilidade do material, quanto maior P_i , maior o potencial de erodibilidade do solo. Tendo em vista o valor de P_i apresentado pela amostra estudada, pode-se inferir que esta possui um baixo potencial de erodibilidade.

Segundo Nogami & Villibor (1995) as argilas lateríticas e as areias finas argilosas possuem geralmente valores de d' acima de 20, podendo ultrapassar 100 no caso das areias finas argilosas, enquanto que as argilas não lateríticas e as areias puras apresentam estes valores baixos. Este comportamento laterítico foi observado na amostra ensaiada.

O coeficiente c' correlaciona-se aproximadamente com a textura da amostra, sendo que valor de c' elevado (acima de 1,5) caracteriza as argilas e solos argilosos, valores entre 1,0 e 1,5, caracterizam vários tipos granulométricos, compreendendo areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltosas, siltes argilosos, siltes arenosos e valores baixos (abaixo de 1,0) caracterizam as areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos (NOGAMI & VILLIBOR, 1995). Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.4 e as características texturais da amostra ensaiada, observou-se uma excelente relação entre o coeficiente c' e a textura quando avaliada com defloculante.

De acordo com Fortes (1990) a diferenciação entre solos de comportamento laterítico e não laterítico pelo método expedito é função da contração e penetração, sendo que os solos de comportamento não laterítico podem contrair ao secar, mas ao reabsorverem água expandem e apresentam alta penetração, já os solos argilosos de comportamento lateríticos apresentam alta contração ($> 0,22$ mm) e baixa penetração ($< 2,0$ mm) conforme foi observado na amostra ensaiada, cujos valores de penetração e contração são respectivamente 0,0 e 1,32mm.

Os altos valores de contração e os baixos valores de penetração da amostra ensaiada relacionam-se bem com o baixo valor de atividade encontrado para a amostra, pois segundo Skempton (1953), *apud* Fortes (1990), quanto menor a atividade menor a potencialidade à mudança de volume.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam respectivamente a carta de classificação utilizada para determinar o grupo MCT pelo método tradicional da metodologia MCT e na metodologia MCT expedita, sendo apresentado a localização da amostra em cada carta, obtida utilizando os valores dos coeficientes apresentados na Tabela 4.4.

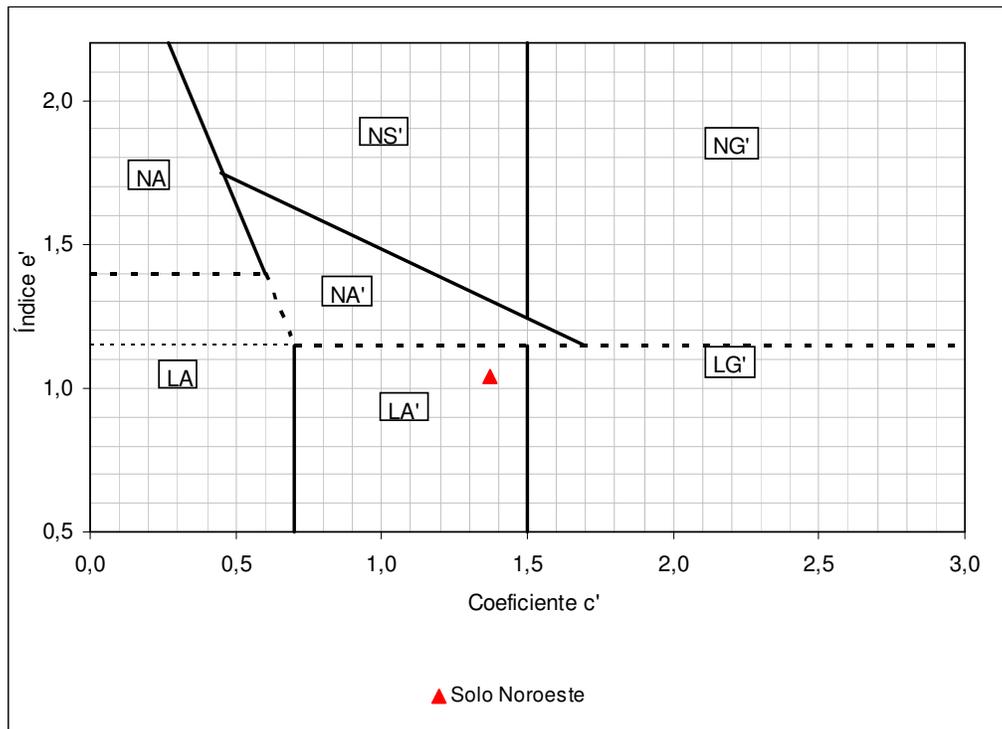


Figura 4.5 Carta de classificação utilizada pelo método tradicional da metodologia MCT

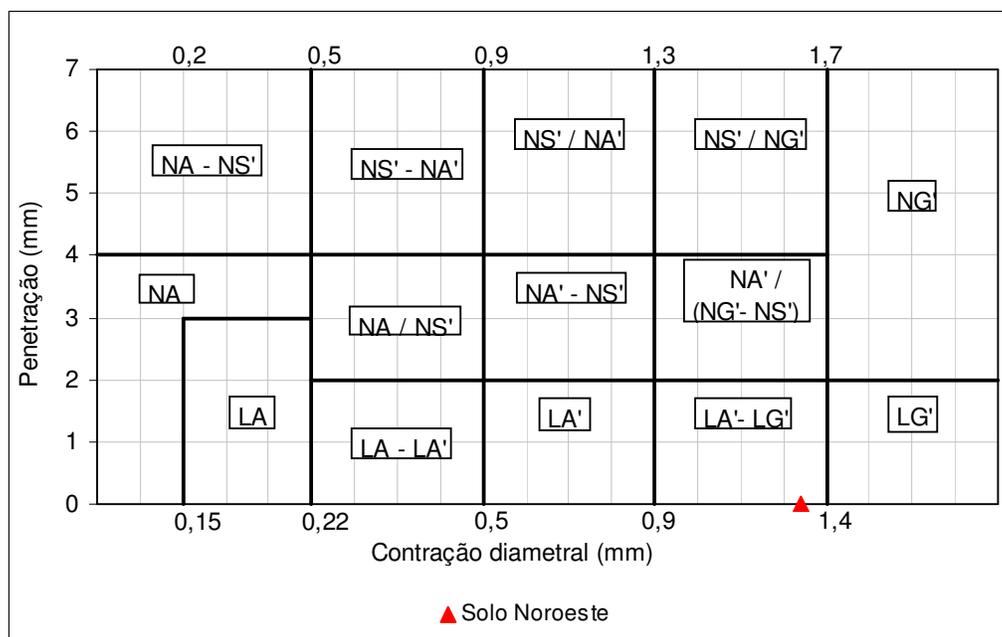


Figura 4.6 Carta de classificação utilizada pelo método das pastilhas

Verifica-se nas Figuras 4.5 e 4.6 que a classificação expedita (método das pastilhas) confirmou os resultados obtidos na classificação MCT tradicional para a amostra estudada.

4.1.3 Caracterização Química

Os resultados da análise química do solo Noroeste estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Resultados das análises químicas.

Descrição	Solo Noroeste
pH em água	6,1
Ca + Mg ⁽¹⁾	0,5
Cálcio ⁽¹⁾	0,3
Magnésio ⁽¹⁾	0,2
Potássio ⁽¹⁾	0,1
Sódio ⁽¹⁾	0,02
Soma dos cátions trocáveis ⁽¹⁾	2,9
Alumínio ⁽¹⁾	0,0
Acidez total (H+Al) ⁽¹⁾	4,1
CTC ⁽¹⁾	5,9
Saturação de alumínio (%)	0,0
Saturação de bases (%)	8,0
Carbono orgânico (g/kg)	4,7
Matéria orgânica (g/kg)	8,1
Fósforo (mg/dm ³)	1,7

OBS: (1) unidades em cmol_c/dm³ = mE/100ml.

Na Tabela 4.5 verifica-se que o solo Noroeste apresentou um valor CTC elevado, o que já era esperado tendo em vista o percentual considerável de argila presente na amostra, quando da análise granulométrica efetuada com defloculante, além da presença de montmorilonita, como pode ser verificado na Tabela 4.6.

Outro fato também relacionado a alta capacidade de troca catiônica do solo Noroeste é o alto teor de matéria orgânica presente neste solo.

Com relação aos demais minerais presentes no solo Noroeste, verificou-se que todos contribuem para a redução dos valores da CTC, ou seja, tanto os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (gibbsite, hematita e goethita) quanto o quartzo apresentam baixa CTC.

Jacinto (2005), em sua dissertação de mestrado, destaca que solos com maior teor de alumínio livre tendem a ter maior floculação. No entanto, o solo do Noroeste, apesar de um

alto teor de floculação não possui alumínio livre, fato que pode ocorrer em solos tropicais superficiais submetidos a intensos processos de intemperismo.

Com relação ao pH, segundo Aguiar (2010), valores de acidez elevada tendem a indicar solos com maior floculação, o que está coerente para o solo Noroeste, que se apresenta moderadamente ácido e com alto teor de floculação, segundo as análises granulométricas com e sem defloculante.

4.1.4 Caracterização Mineralógica – Difração de Raios-X

A difração de raios-X foi realizada segundo quatro análises: amostra integral, fração argila ao natural, fração argila glicolada e fração argila calcinada. A Figura 4.7 apresenta o difratograma da amostra ensaiada.

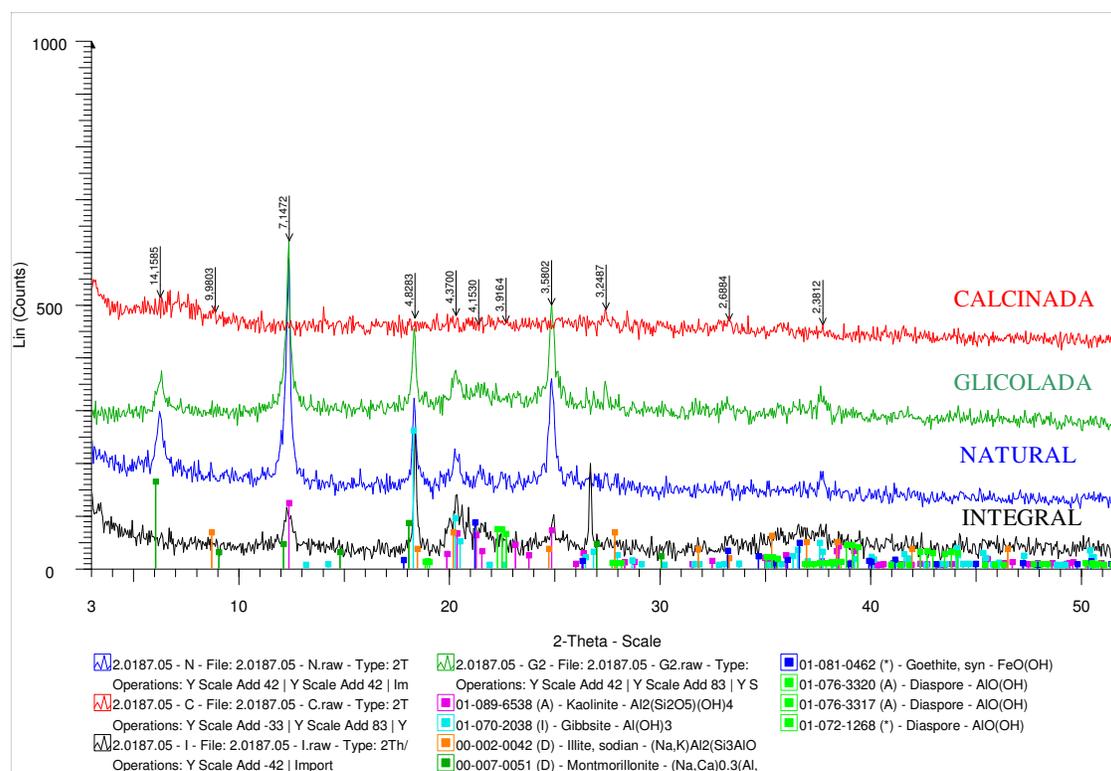


Figura 4.7 Difratograma do solo Noroeste.

A Tabela 4.6 apresenta os principais minerais prováveis identificados nas análises mineralógicas.

Tabela 4.6 Minerais identificados no difratograma.

Descrição	Solo Noroeste
Minerais Principais	gibbsite
Minerais Subordinados	quartzo, caulinita e hematita
Minerais Traço	Montmorilonita, goethita e diásporo

O solo Noroeste apresenta predominância de gibbsite, quartzo, óxido-hidróxido de ferro e alumínio e caulinita. O solo Noroeste (Figura 4.6) apresenta, devido à profunda intemperização pela qual passou, predominância (minerais principais) de hidróxidos de alumínio (gibbsite). A grande intemperização deste solo é reforçada pela presença de caulinita e óxidos de ferro (hematita) como minerais subordinados.

Cardoso *et al.* (2003), estudando solos do Distrito Federal, concluiu que os solos finos da região têm como seus principais minerais a caulinita, a gibbsite e a illita, sendo que, nos solos silteosos, a illita é o mineral principal e, nos solos argilosos, a gibbsite e a caulinita são predominantes. Portanto, verifica-se que a amostra estudada apresenta as características obtidas por Cardoso *et al.* (2003), para os solos argilosos.

4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A Figura 4.8 apresenta a malha de pontos (pares peso específico aparente seco - umidade) referentes aos 20 corpos de prova compactados em cilindro de 6" (152 mm) de diâmetro nas energias Proctor normal, intermediária e modificada e suas respectivas curvas de compactação. Tais pontos foram numerados sequencialmente de acordo com sua umidade e energia de compactação, sendo as letras N, I e M representativa das energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada, respectivamente.

Na Figura 4.8 também estão representadas as linhas de iso-índice de vazios que identificam os corpos de prova que possuem mesmo índice de vazios e diferentes umidades, além das curvas de iso-grau de saturação que dão um indicativo da variação do grau de saturação dos pontos presentes na malha.

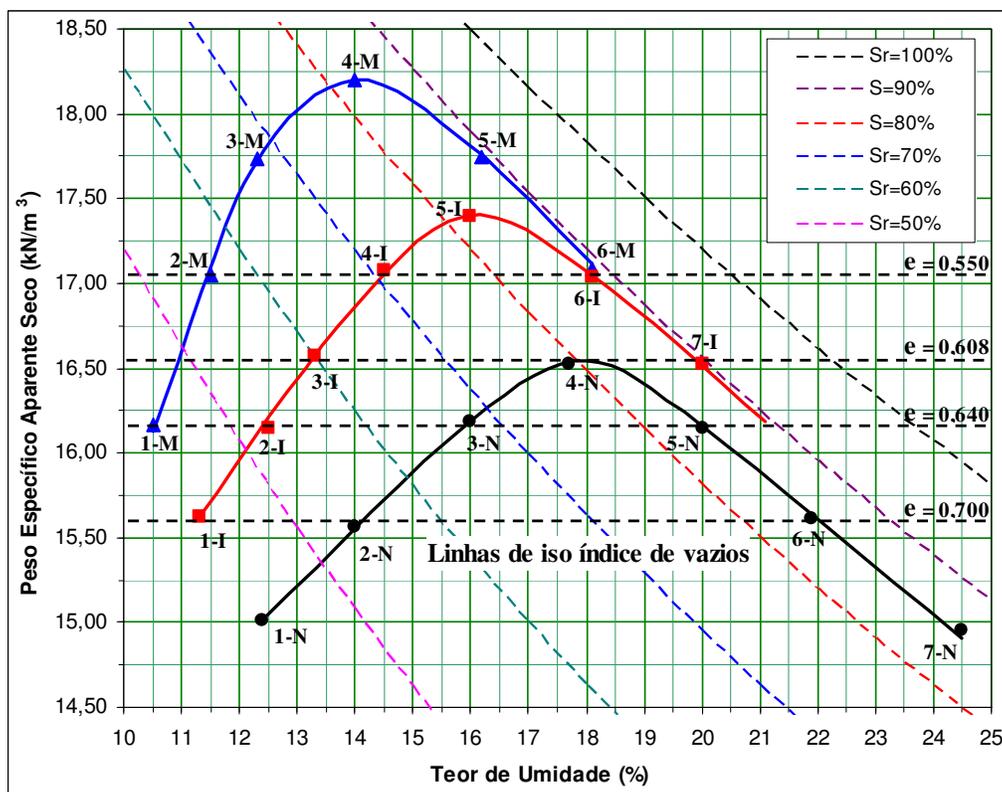


Figura 4.8 Curvas de compactação – energias Proctor normal, intermediária e modificada.

Verifica-se na Figura 4.8 que os pontos de compactação estão bem distribuídos no espaço peso específico aparente seco x teor de umidade, o que conseqüentemente promove uma boa variação dos graus de saturação dos corpos de prova, sendo que esses variam de 45 a 90%, aproximadamente, o que auxiliará nas análises a serem realizadas.

Outro fato importante a se destacar na Figura 4.8 é o paralelismo da linha ótima (linha que une os pontos de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo) com as curvas de saturação, estando esta bem próxima a curva de saturação igual a 80%. Isso indica que a partir deste valor de saturação, independente da energia de compactação, ocorre a oclusão da fase gasosa, para a qual a sucção é pequena. É nesse momento que se começa a gerar propressão positiva quando da compactação, o que promove conseqüentemente a diminuição do peso específico aparente seco para uma mesma energia de compactação. Este fato tende a promover o alinhamento do ramo úmido das curvas de compactação nas três energias, como pode ser visto na figura.

Outro destaque na Figura 4.8 é o aumento da inclinação do ramo seco das curvas de compactação com o aumento da energia de compactação. Este fato é um indicativo da presença de agregações no solo, como foi demonstrado pelas análises granulométricas com e sem presença de defloculante.

A maior inclinação do ramo seco se dá tendo em vista que o aumento da energia de compactação promove a quebra das agregações do solo, o que conseqüentemente promove o aumento da sucção no mesmo. Entretanto, apesar do aumento da sucção, a taxa de diminuição desta com o aumento da umidade do solo se dá de uma forma bem mais acentuada, o que facilita o aumento do peso específico seco.

Este aumento da inclinação é refletido diretamente pelas curvas características da amostra, ou seja, nas curvas características das amostras compactadas nas energias intermediária e modificada, a inclinação do trecho da curva que vai da pressão de entrada de ar dos microporos até a pressão de entrada de ar dos macroporos (trecho correspondente ao ramo seco da curva de compactação) é mais acentuada do que nos corpos de prova compactados na energia Proctor normal. Destaca-se que isso ocorre quando a sucção é plotada no eixo das ordenadas.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de peso específico aparente seco, umidade, grau de saturação e índice de vazios obtidos em cada um dos corpos de prova compactados.

Tabela 4.7 Valores de peso específico aparente seco, umidade, grau de saturação e índice de vazios dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.

Energia	Nome / Ponto	γ_d (kN/m ³)	w (%)	θ_w (%)	Sr (%)	Índice de vazios
Proctor normal	1N	15,01	12,4	19,0	44,0	0,764
	2N	15,57	14,0	22,2	53,8	0,700
	3N	16,18	16,0	26,4	68,1	0,637
	4N	16,47	17,7	29,7	78,6	0,608
	5N	16,20	20,0	33,0	85,0	0,635
	6N	15,61	21,9	34,9	85,0	0,696
	7N	14,96	24,5	37,4	85,9	0,770
Proctor intermediária	1I	15,62	11,3	18,0	44,1	0,695
	2I	16,14	12,5	20,6	52,8	0,641
	3I	16,57	13,3	23,4	60,1	0,598
	4I	17,07	14,5	25,2	71,3	0,551
	5I	17,40	16,0	28,2	82,7	0,522
	6I	17,04	18,1	31,5	88,2	0,554
	7I	16,53	20,0	33,7	89,7	0,602
Proctor modificada	1M	16,15	10,5	17,0	44,5	0,639
	2M	17,05	11,5	20,0	56,1	0,553
	3M	17,74	12,3	22,3	67,3	0,493
	4M	18,21	14,0	25,4	83,1	0,454
	5M	17,74	16,2	29,3	88,9	0,493
	6M	17,09	18,1	31,5	89,0	0,550

Legenda:

S_r: Grau de saturação

w: Teor de umidade gravimétrica

γ_d : Peso específico aparente seco

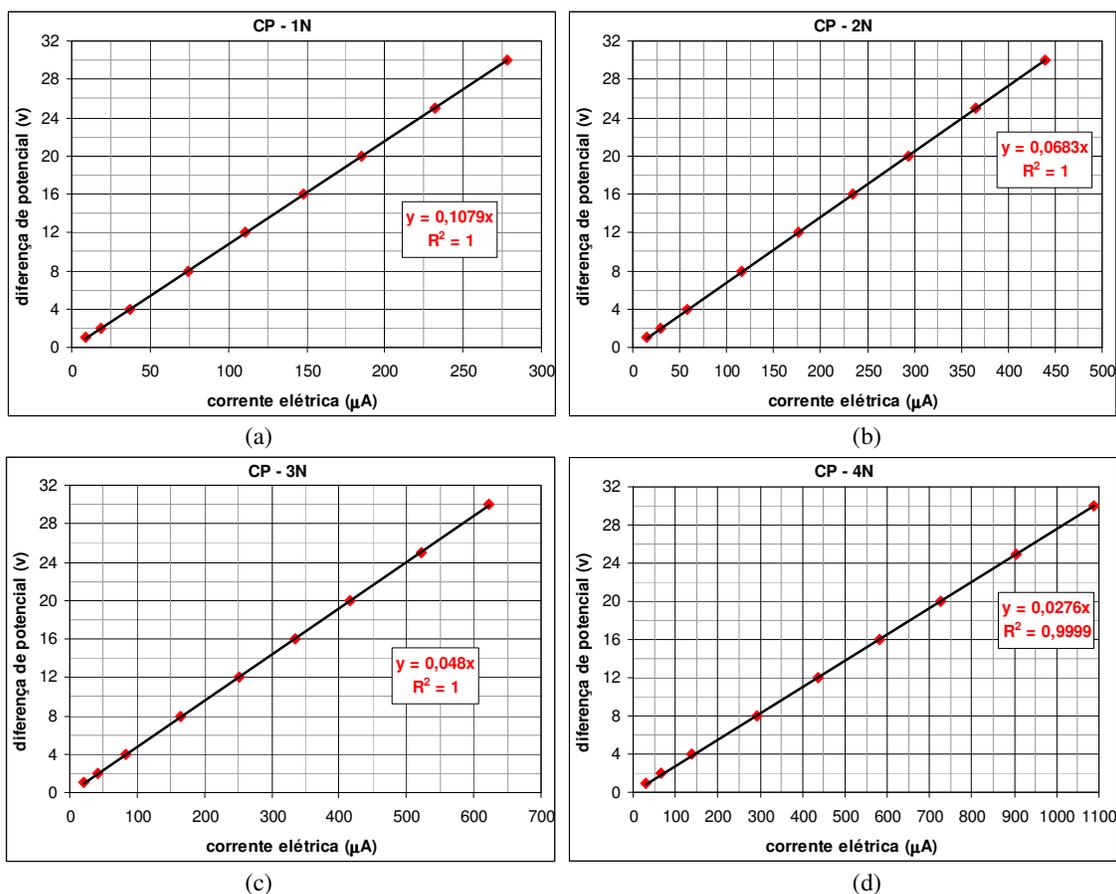
θ_w : Teor de umidade volumétrica

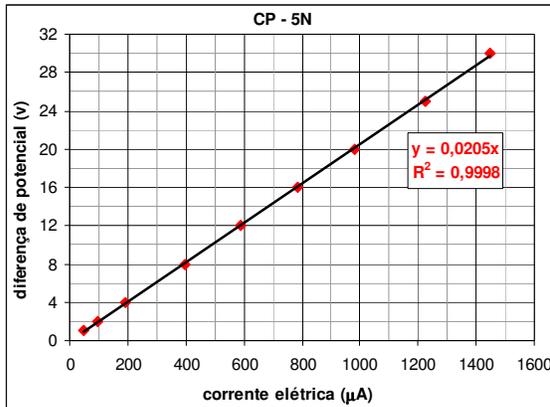
4.3 ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

4.3.1 Medidas de Resistividade Elétrica nos Corpos de Prova de 6''

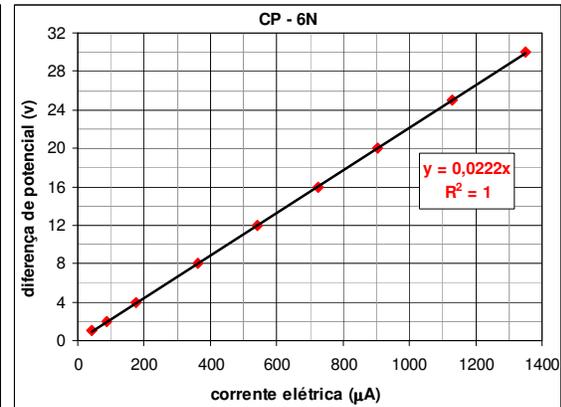
As Figuras 4.9 (a - g), 4.10 (a - g) e 4.11 (a - f) apresentam, para cada um dos corpos de prova compactados em cilindro de 6'' (152 mm), a relação entre a diferença de potencial aplicada ao corpo de prova e a corrente elétrica medida no mesmo, para as energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada, respectivamente.

Em todas as figuras observa-se que a relação entre a diferença de potencial e a corrente elétrica é linear e se ajustam muito bem à reta de regressão. Esse ajuste é expresso, nos gráficos, pelo coeficiente de determinação R^2 bem próximo de 1. Este fato indica que apesar de o solo compactado ser um meio heterogêneo particulado formado por três materiais – solo, água e ar, este apresenta para, os níveis de ddp aplicados, um comportamento eletroresistivo condizente com o modelo proposto pela Lei de Ohm.

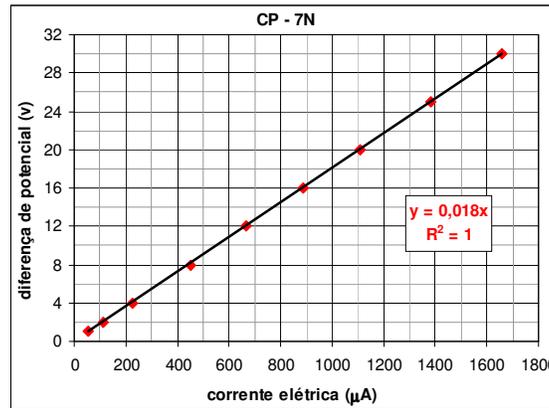




(e)

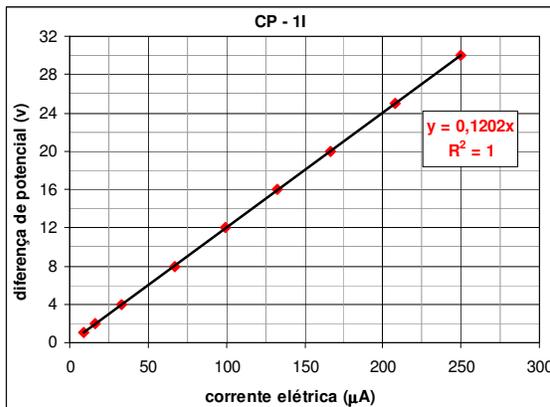


(f)

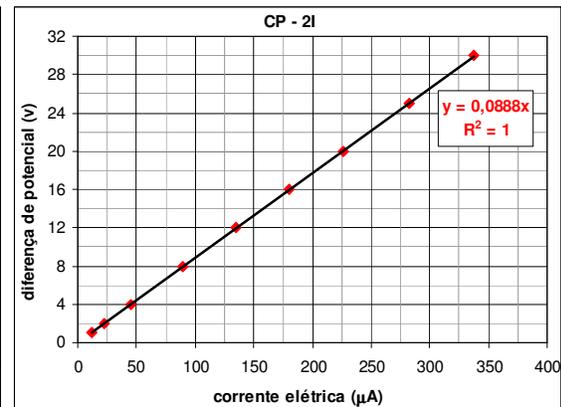


(g)

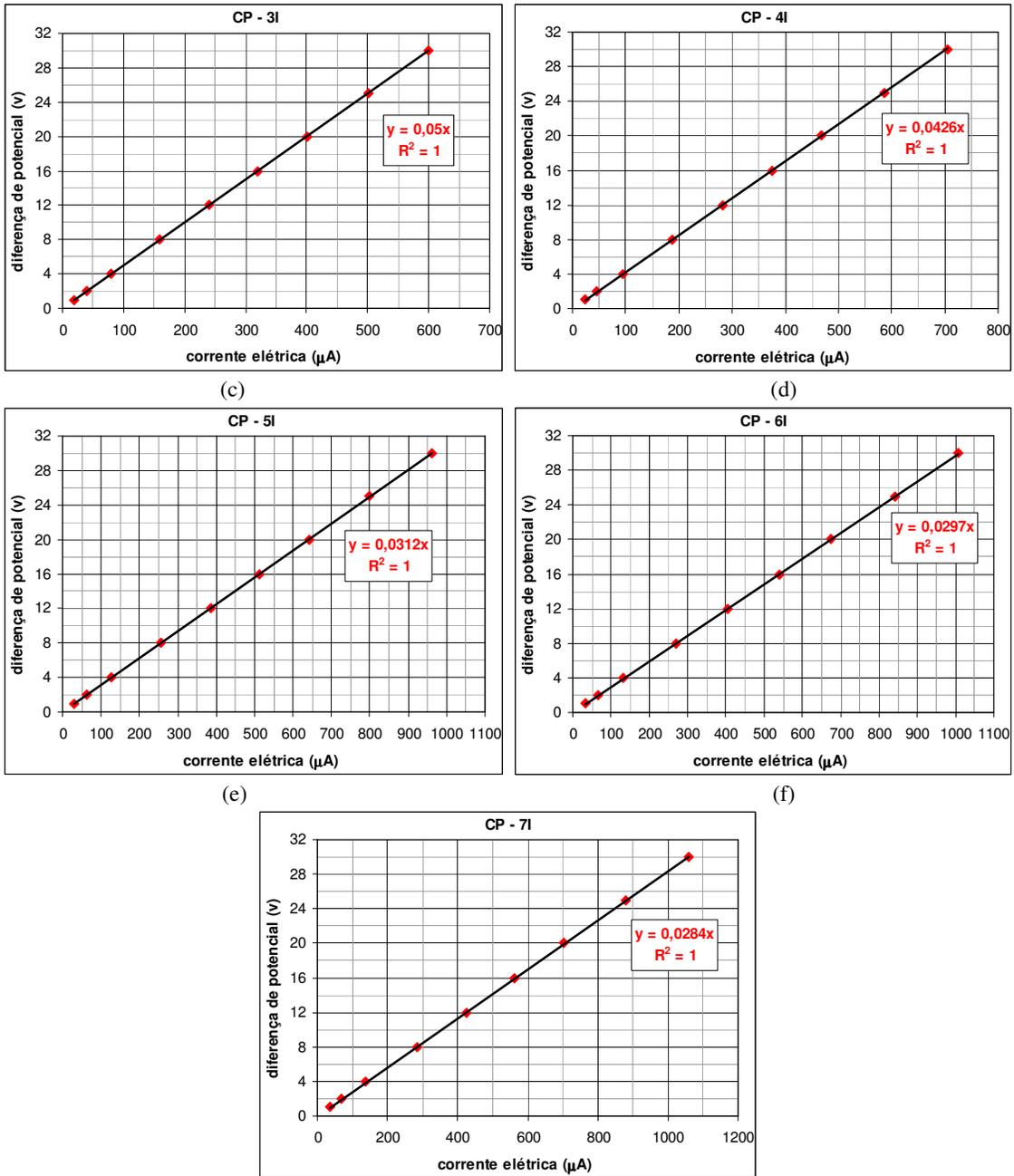
Figura 4.9 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 1N, b) CP 2N, c) CP 3N, d) CP 4N, e) CP 5N, f) CP 6N, g) CP 7N.



(a)



(b)



(g)
 Figura 4.10 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.

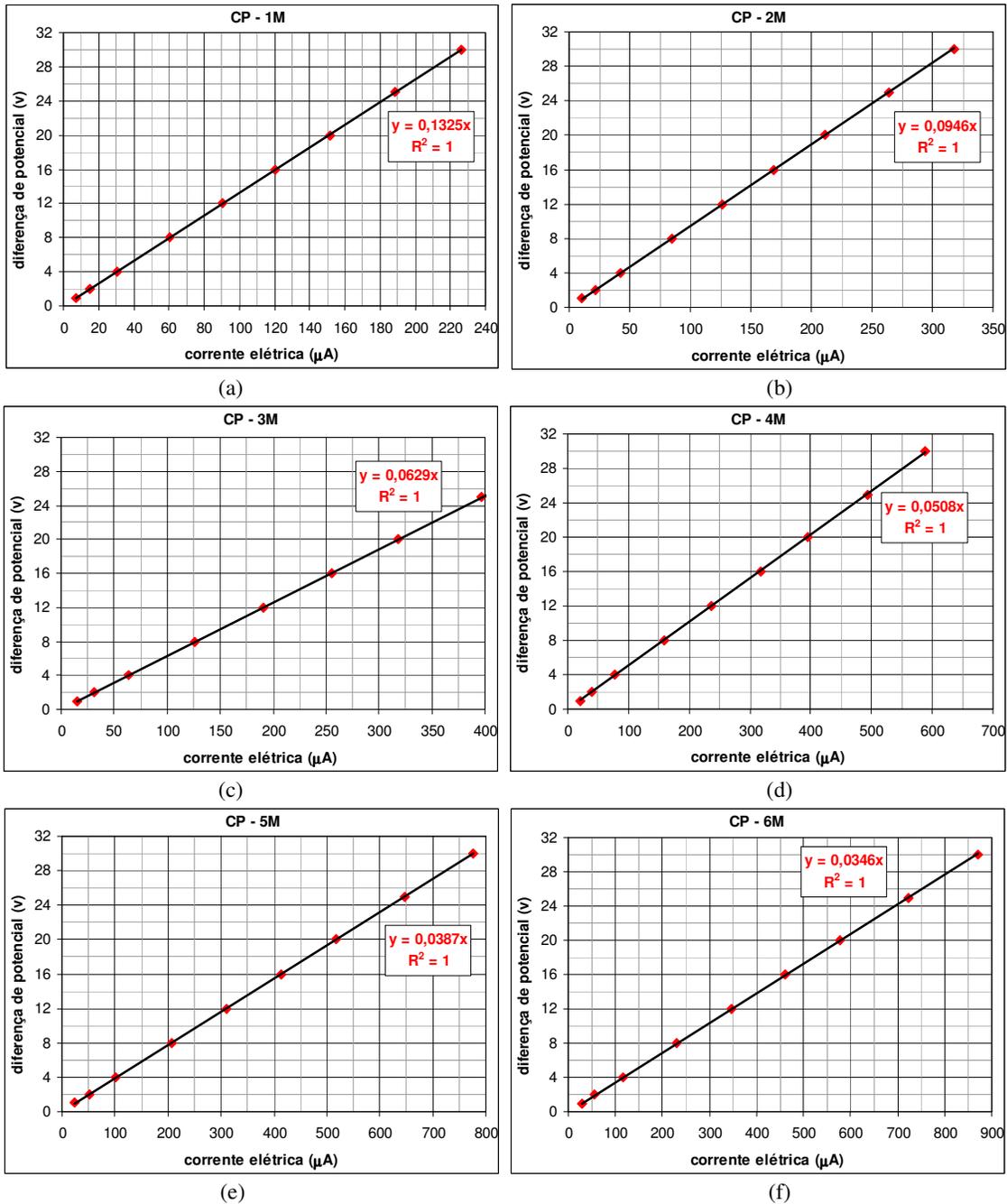


Figura 4.11 Relação ddp / corrente – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 1M, b) CP 2M, c) CP 3M, d) CP 4M, e) CP 5M, f) CP 6M.

Nas figuras expostas acima, o coeficiente linear das equações nos gráficos expressa em $M\Omega$ a resistência elétrica apresentada pelos corpos de prova em cada uma das condições de compactação. Na Tabela 4.8 são apresentados os valores de resistividade elétrica calculados por meio da Equação 4.1, utilizando-se os valores de resistência elétrica e as dimensões dos corpos de prova.

$$\rho = 10^6 \cdot R \cdot \frac{A}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$);

A = área da seção transversal do corpo de prova (m^2), igual a 0,01815 m^2 ;

L = comprimento do corpo de prova (m), igual a 0,1146 m;

R = resistência elétrica ($M\Omega$), sendo esta igual a $\frac{V}{i}$, com;

i = corrente elétrica (μA);

V = diferença de potencial (V);

Tabela 4.8 Valores de resistência e resistividade elétrica dos corpos de prova compactados nas diferentes condições de compactação.

Energia	Nome / Ponto	Resistência elétrica (Ω)	Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)
Proctor normal	1N	107900	17095
	2N	68300	10821
	3N	48000	7605
	4N	27600	4373
	5N	20500	3248
	6N	22200	3517
	7N	18000	2852
Proctor intermediária	1I	120200	19044
	2I	88800	14069
	3I	50000	7922
	4I	42600	6749
	5I	31200	4943
	6I	29700	4705
	7I	28400	4500
Proctor modificada	1M	132500	20992
	2M	94600	14988
	3M	62900	9965
	4M	50800	8048
	5M	38700	6131
	6M	34600	5482

Destaca-se que os valores de resistividade elétrica obtidos nesta pesquisa (de 2800 a 20900 Ωm) são superiores aos comumente apresentados na literatura. Segundo a norma DNER – ME 040/95 – Prospecção geofísica pelo método da eletroresistividade, a resistividade elétrica de solos argilosos geralmente se situa entre 100 e 500 Ωm .

No entanto, é importante salientar que apesar da amostra estudada neste trabalho possuir características argilosas, sua porcentagem de areia, mesmo na análise com defloculante, é bastante relevante. Esse fato associado à presença de quartzo (resistividade elétrica igual a 10^{12} Ωm , segundo a DNER – ME 040/95), indicada na análise mineralógica, pode ser o motivo de o solo estudado apresentar valores de resistividade elétrica elevados.

Outro fato, também relevante para o aumento da resistividade elétrica da amostra estudada, foi a utilização da água de abastecimento no processo de compactação, tendo em vista que esta água possui salinidade praticamente nula, aproximadamente 0,1 ppm (segundo os critérios estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 a salinidade da água para o abastecimento e consumo humano deve ser menor que 0,5 ‰), o que afeta diretamente seu potencial de condutividade elétrica.

4.3.2 Comparação Entre a Resistividade Elétrica e as Características Físicas dos Corpos de Prova de 6”

Nesta seção apresenta-se uma comparação gráfica entre os índices físicos dos corpos de prova compactados e a resistividade elétrica apresentada por esses, em cada condição de compactação. Além da comparação geral realizada com todos os pontos, também foram feitas comparações utilizando conjuntos de pontos específicos, como por exemplo, a variação da resistividade elétrica com os índices físicos nos corpos de prova de mesmo grau de saturação e ou índice de vazios.

As Figuras 4.12 a 4.14 apresentam a comparação dos valores de resistividade elétrica dos corpos de prova com os valores de teor de umidade gravimétrica, teor de umidade volumétrica e grau de saturação. Em todas as figuras, foi adicionada, à nuvem de pontos, uma curva de regressão do tipo potência, tendo em vista que para os resultados obtidos esta foi a que melhor se ajustou ao comportamento do material.

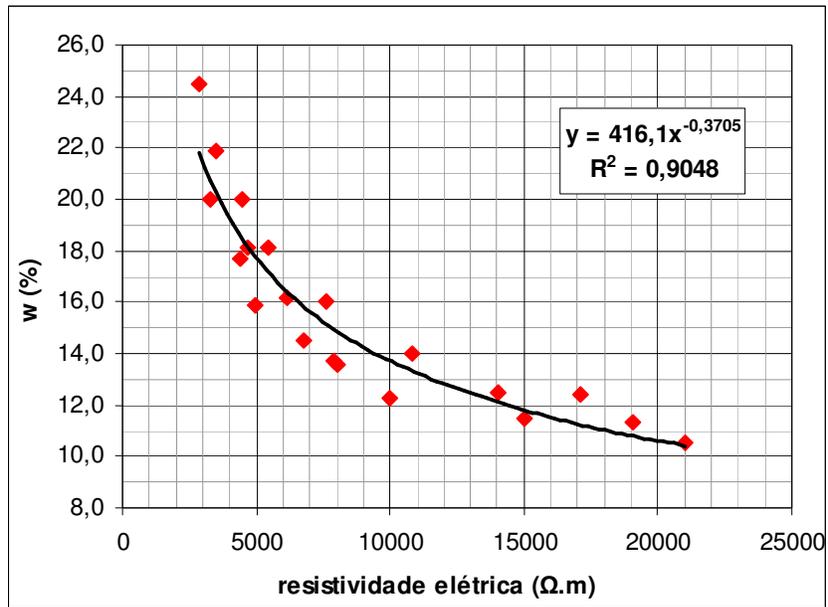


Figura 4.12 Teor de umidade gravimétrica x resistividade elétrica.

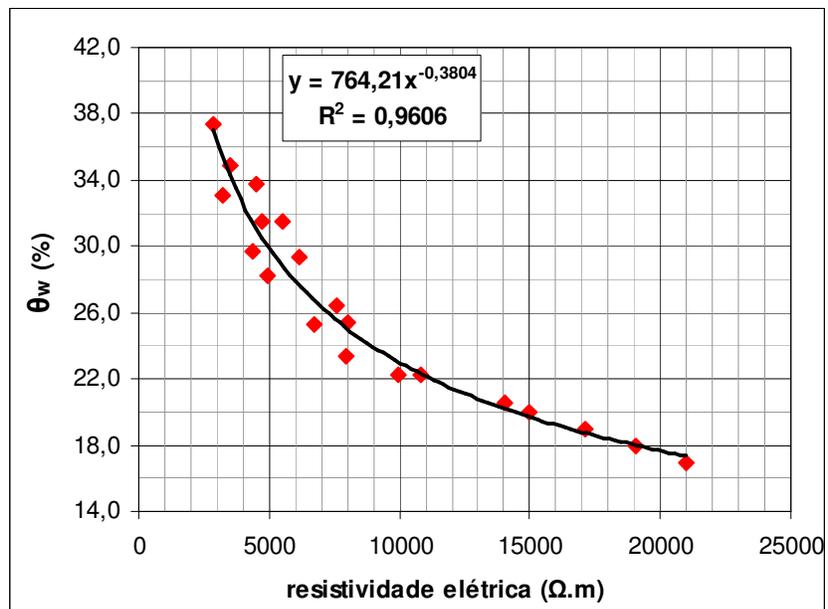


Figura 4.13 Teor de umidade volumétrica x resistividade elétrica.

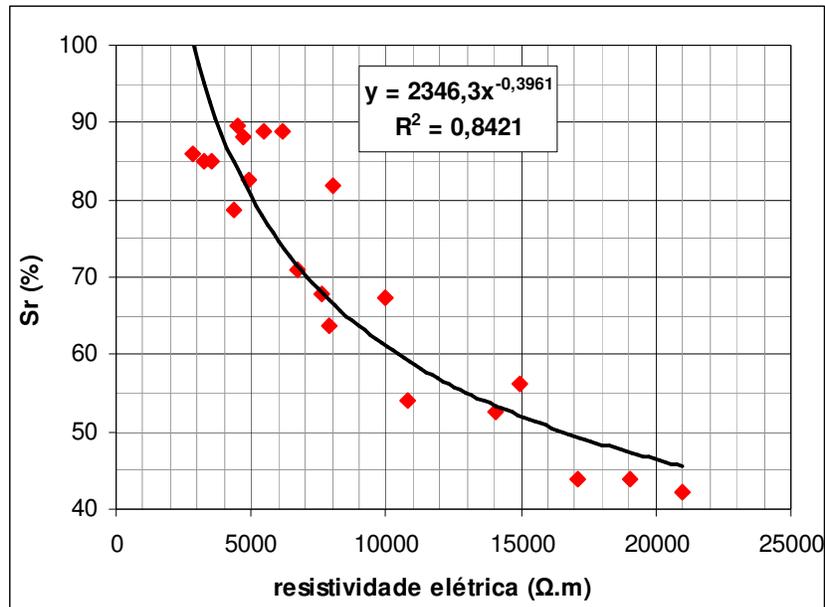


Figura 4.14 Grau de saturação x resistividade elétrica.

Nas figuras apresentadas acima verifica-se uma boa relação entre os índices físicos apresentados e a resistividade elétrica dos corpos de prova. O coeficiente de determinação próximo de 1 indica que a regressão do tipo potência se ajustou bem à nuvem de pontos em todas as comparações, e o expoente negativo da equação indica que a relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto menores são os teores de umidade ou o grau de saturação, maior é a resistividade elétrica apresentada pelo corpo de prova. O bom ajuste da curva de potência nestas figuras indica que a taxa com que se dá o aumento da resistividade elétrica com a diminuição dos índices físicos (w , θ_w e S_r) é maior quanto menor forem os valores destes.

Verifica-se ainda, na Figura 4.14, que o grau de saturação não é o principal condicionante da resistividade elétrica, pois os resultados apresentados mostram que os corpos de prova com mesmo grau de saturação podem apresentar resistividades elétricas diferentes, sendo que este fato ocorre principalmente para os corpos de prova com graus de saturação entre 80 e 90%.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam a comparação dos valores de resistividade elétrica dos corpos de prova com os valores de peso específico aparente seco e índice de vazios, respectivamente.

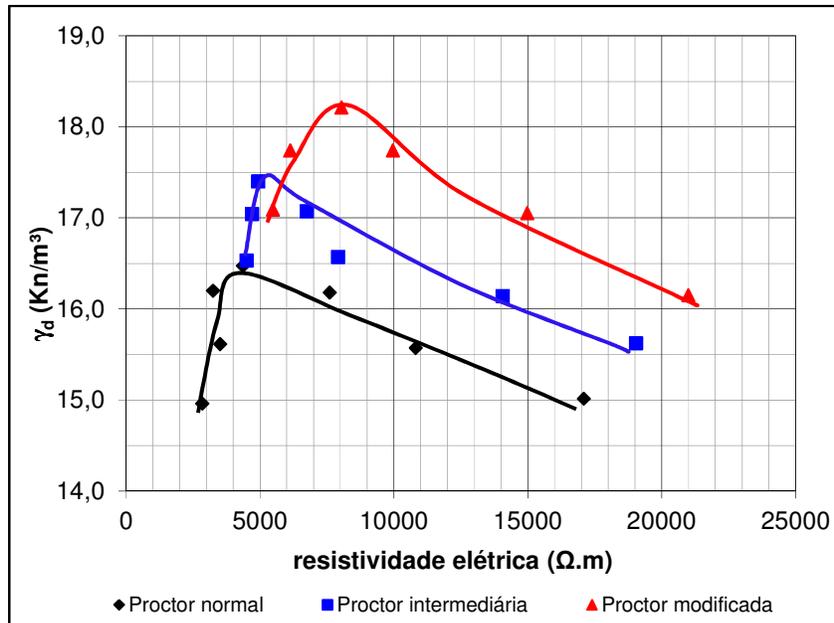


Figura 4.15 Peso específico aparente seco x resistividade elétrica.

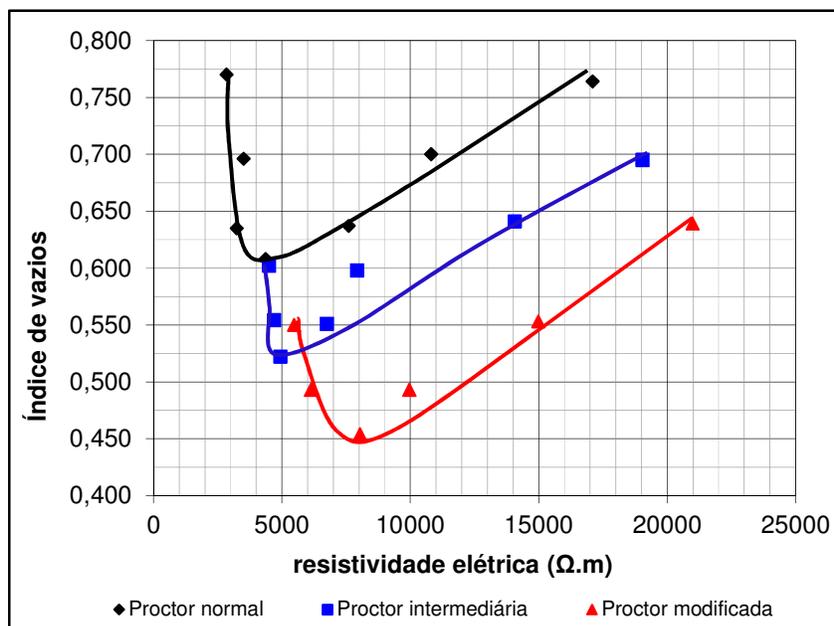


Figura 4.16 Índice de vazios x resistividade elétrica.

Verifica-se nas Figuras 4.15 e 4.16 a não existência de uma correlação direta entre a resistividade elétrica e estes dois índices físicos, tendo em vista que os pontos apresentados nos gráficos demonstram-se muito dispersos no espaço resistividade elétrica x peso específico aparente seco ou índice de vazios. No entanto fazendo a análise por famílias de energia de compactação, verifica-se que o comportamento da relação resistividade elétrica x peso

específico aparente seco e ou índice de vazios, segue comportamento semelhante ao da curva de compactação.

Fazendo uma análise específica utilizando os resultados dos corpos de prova de mesmo grau de saturação, pode se observar na Figura 4.17, que a tendência da resistividade elétrica é diminuir com a redução da massa específica aparente seca do solo, ao contrário do que se esperava, que para um mesmo grau de saturação amostras mais densas conduziram mais corrente do que amostras mais fofas. Isto ocorre porque apesar do mesmo grau de saturação, o volume de água em relação ao volume total do corpo de prova, que é expresso pelo teor de umidade volumétrico, aumenta, com a diminuição de sua massa específica aparente seca.

Estas observações são condizentes com o exposto anteriormente, e indicam também que não é o grau de saturação o principal condicionante da resistividade elétrica do solo e sim o volume de água presente na amostra. Na Figura 4.18, que apresenta a relação entre umidade volumétrica e resistividade elétrica para corpos de prova de mesmo grau de saturação, pode-se observar o exposto pelo alinhamento das curvas de diferentes graus de saturação, de uma forma mais clara.

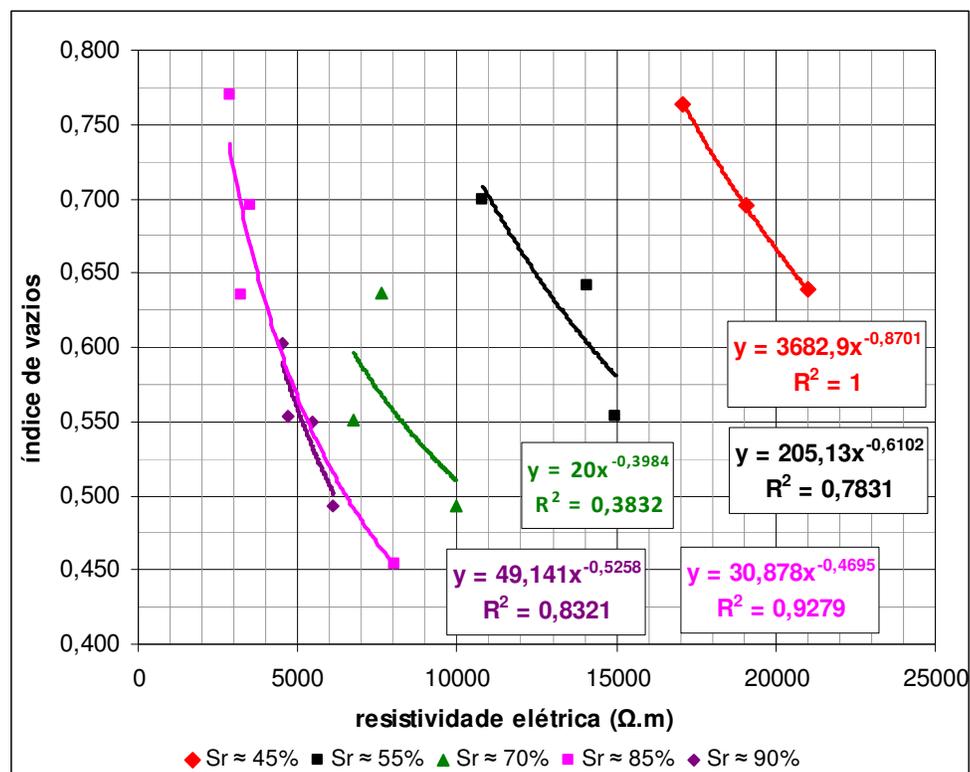


Figura 4.17 Índice de vazios x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo grau de saturação.

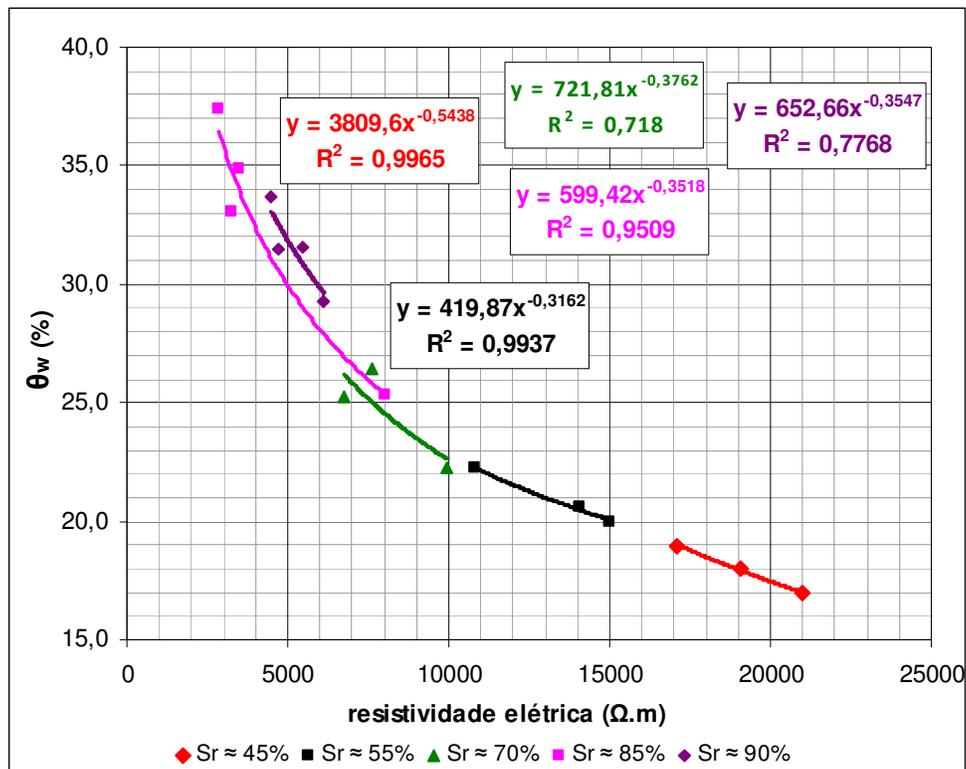


Figura 4.18 Umidade gravimétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo grau de saturação.

Ainda na Figura 4.17 avaliando isoladamente a variação da resistividade elétrica com o índice de vazios do solo, pode-se afirmar que, para altos valores de grau de saturação, a influência da variação do índice de vazios na variação da resistividade elétrica é pequena; sendo mais pronunciada para os baixos valores de grau de saturação. Pode-se inferir ainda que para valores de grau de saturação iguais a 85 e 90% a contribuição da variação do índice de vazios na variação da resistividade elétrica é praticamente equivalente e que para valores de grau de saturação inferiores a 70% a contribuição da variação do índice de vazios para a variação da resistividade elétrica aumenta de forma significativa, o que pode indicar que a descontinuidade da fase água no interior da amostra estudada começa a ocorrer para um grau de saturação situado entre 70 e 85%.

A Figura 4.19 apresenta, para corpos de prova de mesmo índice de vazios, a variação da resistividade elétrica com a variação do grau de saturação. Esta figura indica que para um mesmo índice de vazios a resistividade elétrica varia exponencialmente com grau de saturação, sendo a relação inversamente proporcional. Se for desconsiderada a curva referente ao índice de vazios igual a 0,608, os resultados apresentados na Figura 4.19 demonstram uma tendência de deslocamento para a direita das curvas com a diminuição dos índices de vazios. Este afastamento indica, assim como a Figura 4.17, que mantendo-se o mesmo grau de

saturação a variação do índice de vazios promove uma variação na resistividade elétrica do solo. No entanto, comparando-se as Figura 4.17 e 4.19 verifica-se que o afastamento das curvas é bem mais pronunciado na Figura 4.17, o que indica que a variação do grau de saturação tem uma influência maior na resistividade elétrica do solo do que a variação do índice de vazios.

Todo o exposto também pode ser observado na Figura 4.20 que apresenta a superfície formada pela análise tridimensional utilizando os valores de graus de saturação x índice de vazios x resistividade elétrica. Destaca-se aqui que, para uma melhor interpolação no processo de geração da superfície tridimensional na Figura 4.20, os valores de índice de vazios estão apresentados em porcentagem, ou seja, índice de vazios multiplicados por 100, para se adequarem à escala de valores do grau de saturação. O processo de interpolação utilizado na confecção das superfícies foi o de krigagem e a ferramenta computacional utilizada foi o *software* Surfer versão 9.0.

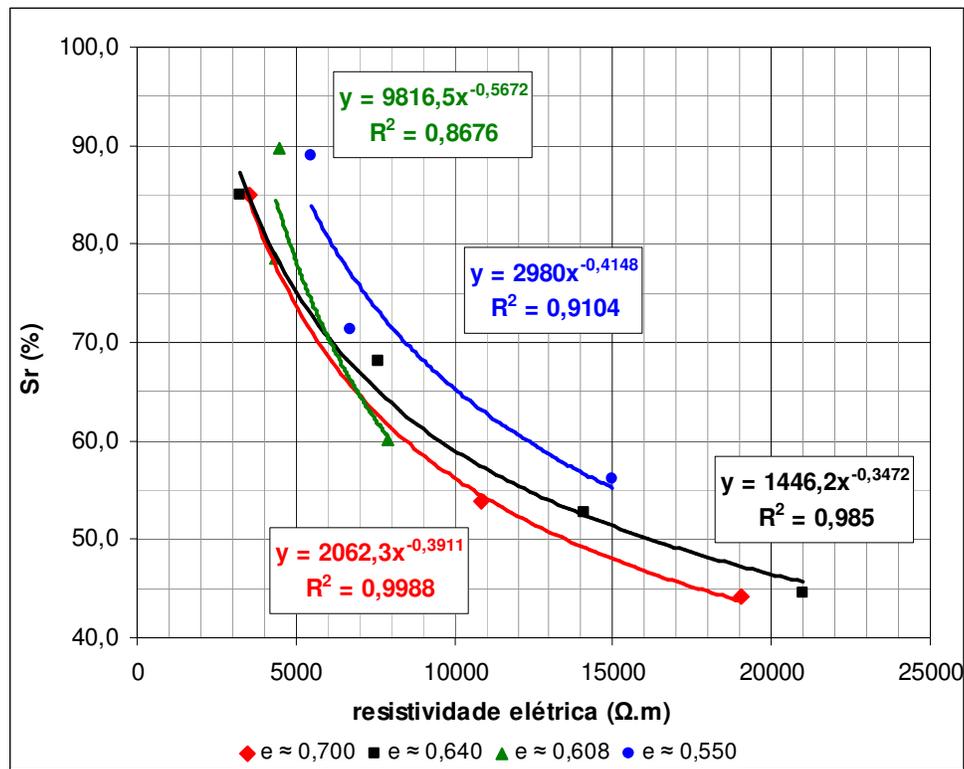


Figura 4.19 Grau de saturação x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

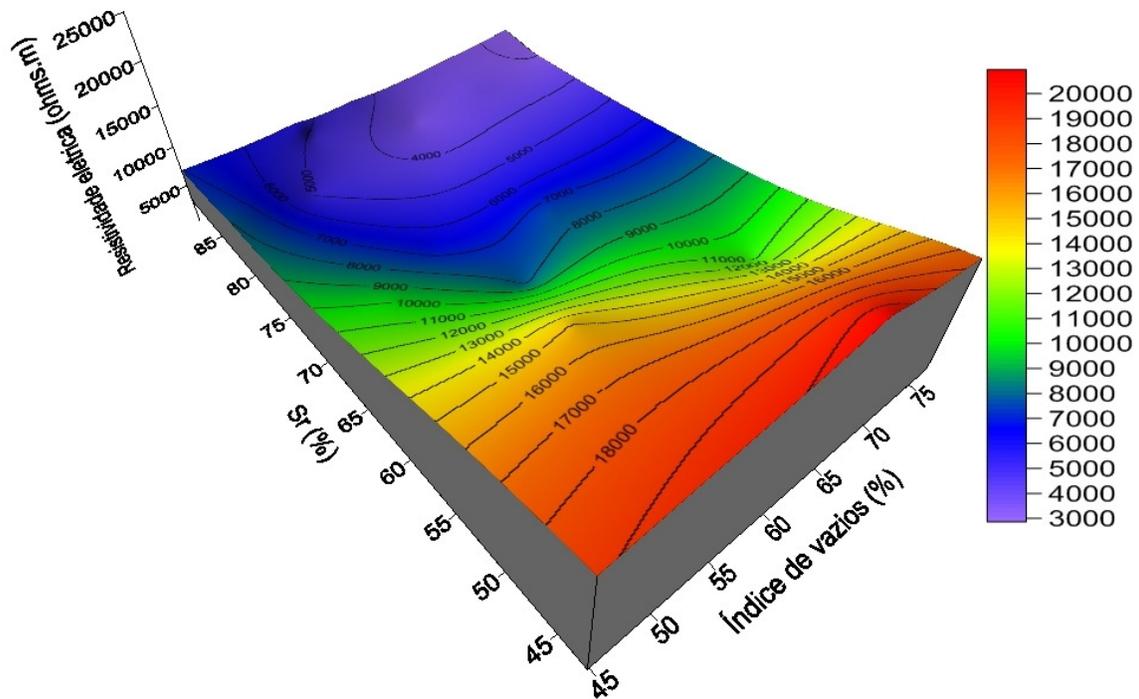


Figura 4.20 Superfície: resistividade elétrica x grau de saturação x índice de vazios.

As Figuras 4.21 e 4.22 demonstram para corpos de prova de mesmo índice de vazios a variação da resistividade elétrica com a variação dos teores de umidade gravimétrica e volumétrica, respectivamente. Nessas figuras observa-se que a análise, agora feita em termos dos teores de umidade, promove a aproximação das curvas, principalmente em relação ao teor de umidade volumétrica (Figura 4.22). Esta aproximação indica que, em relação aos teores de umidade gravimétricas e volumétricas, a variação da densidade do solo promove pequena influência na variação de sua resistividade elétrica, sendo esta influência menor ainda quando os resultados são analisados em função do teor de umidade volumétrica. Este fato pode ser observado com mais clareza nas Figuras 4.23 e 4.24 que apresentam respectivamente a superfície formada pela análise tridimensional utilizando os valores de umidade gravimétrica x peso específico aparente seco x resistividade elétrica e de umidade volumétrica x peso específico aparente seco x resistividade elétrica.

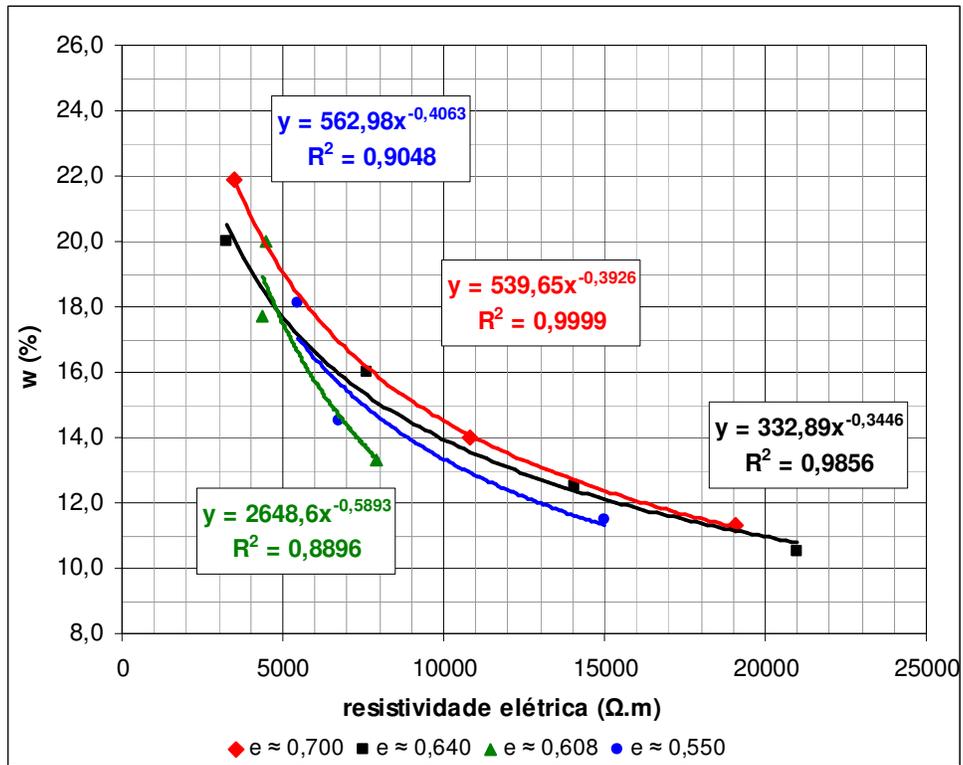


Figura 4.21 Umidade gravimétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

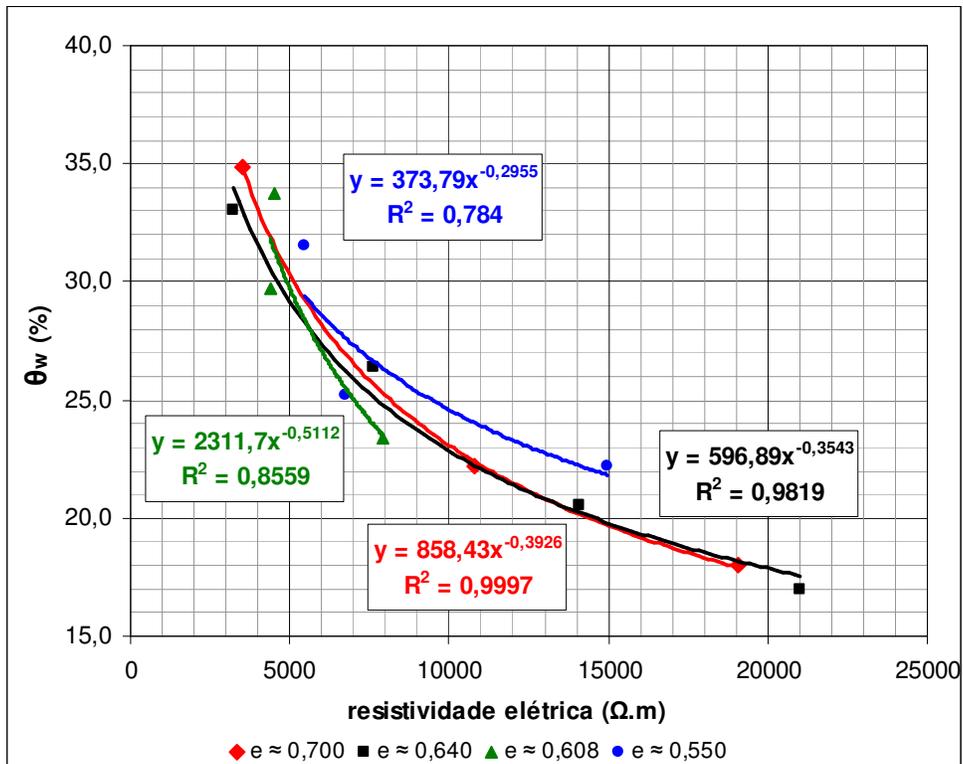


Figura 4.22 Umidade volumétrica x resistividade elétrica – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

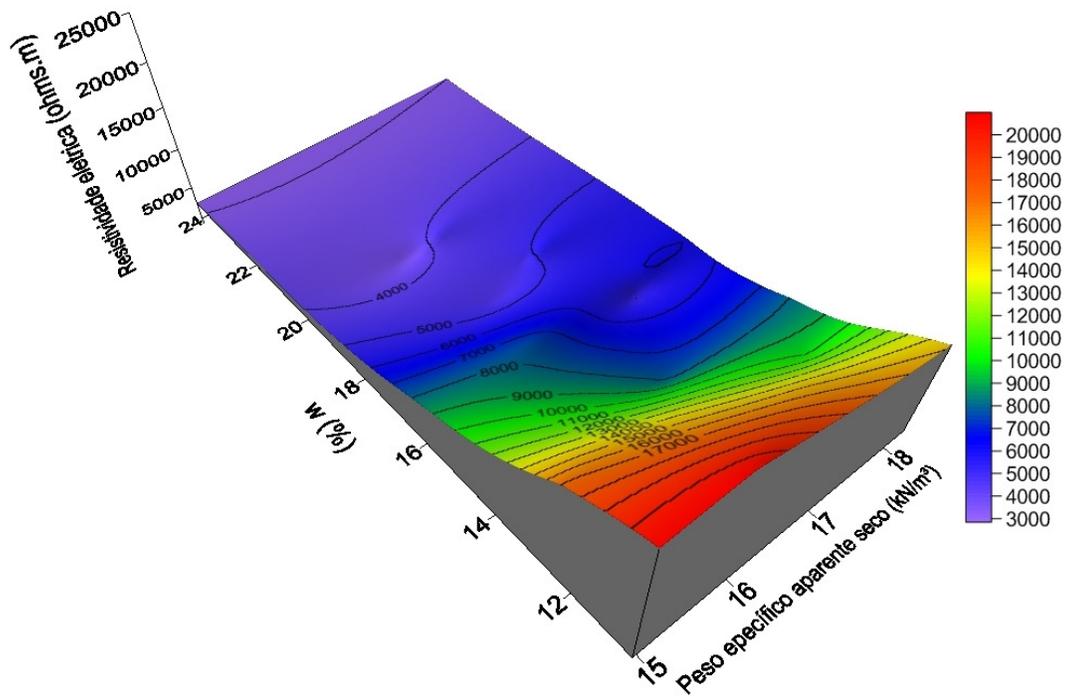


Figura 4.23 Superfície: resistividade elétrica x umidade gravimétrica x peso específico aparente seco.

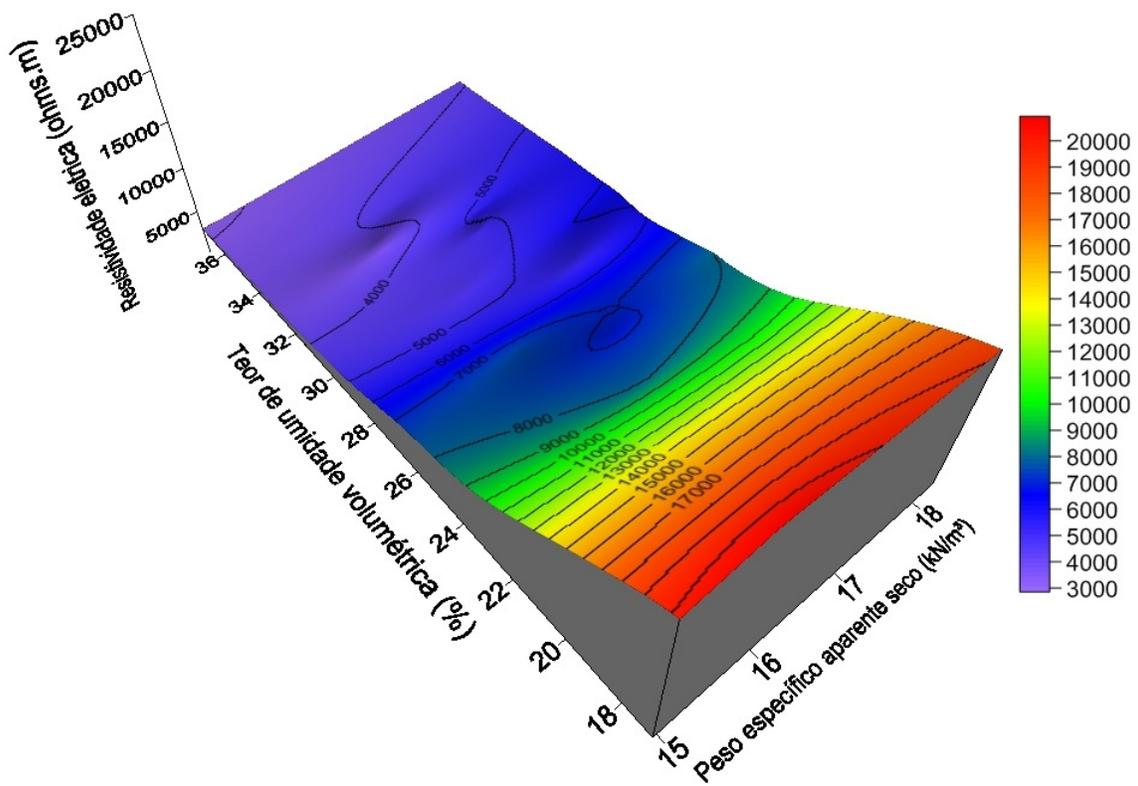


Figura 4.24 Superfície: resistividade elétrica x umidade volumétrica x peso específico aparente seco.

Fazendo uma síntese sobre os resultados apresentados, salienta-se que, para a amostra estudada, mantendo-se a mesma umidade e aumentando a densidade do solo a tendência da resistividade elétrica é diminuir, justamente porque esse processo aumentando a umidade volumétrica do solo. No entanto, quando se mantém o grau de saturação constante e aumenta-se a densidade do solo, sua resistividade elétrica aumenta, justamente porque para se manter o mesmo grau de saturação com o aumento da densidade deve ocorrer uma diminuição da quantidade de água no solo. Diante disto, pode-se concluir que o principal condicionante da resistividade elétrica do solo estudado é sua umidade volumétrica.

Pensando-se então na utilização da técnica para controle de compactação, a relação entre resistividade elétrica e grau de saturação, apesar de apresentar um coeficiente de determinação consideravelmente bom, não se mostra como uma boa alternativa, tendo em vista que os resultados apresentados se mostraram dispersos para os valores de graus de saturação que geralmente são apresentados por amostras de solos compactados na condição de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo.

É importante destacar aqui que a comparação entre os teores de umidade gravimétrica e volumétrica e a resistividade elétrica é, entre todas as comparações realizadas, as que apresentam a melhor relação, sendo a relação em função da umidade volumétrica a que apresentou um coeficiente de determinação mais próximo de 1. Diante disto a utilização dessas relações para controle de compactação em campo se mostram, em um primeiro momento, como uma boa alternativa, tendo em vista que a partir dos valores de umidade gravimétrica e umidade volumétrica pode se chegar aos valores de peso específico aparente seco (Equação 4.2).

$$\gamma_d = \frac{\theta}{w} \rho_w \cdot g \quad (4.2)$$

Onde:

γ_d = peso específico aparente seco (kN/m³);

w = teor de umidade gravimétrica (%);

θ_w = teor de umidade volumétrica (%);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

ρ_w = massa específica da água (g/cm³).

No entanto, existe a necessidade de se avaliar a sensibilidade do método, ou seja, como o erro gerado no processo de calibração da resistividade elétrica com os teores de

umidade gravimétrica e volumétrica pode afetar os resultados de peso específico aparente seco calculados.

4.4 ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA

A Tabela 4.9 apresenta para as misturas de água + sal e água + sal + solo, nas cinco condições de salinidades estudadas, conforme item 3.3.1, os valores de salinidade, condutividade elétrica e resistividade elétrica obtidos. Cabe destacar que a sonda utilizada para as aferições dos dados acima fornecia o valor da condutividade elétrica do líquido em $\mu\text{S/cm}$, sendo o valor da resistividade elétrica em $\Omega\cdot\text{m}$ facilmente obtido utilizando-se a Equação 4.3.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \cdot 10^4 \quad (4.3)$$

Onde:

σ = condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$);

ρ = resistividade elétrica ($\Omega\cdot\text{m}$).

Tabela 4.9 Valores de condutividade e resistividade elétrica das águas estudadas.

Misturas	Numero	Salinidade (ppm)	Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Resistividade elétrica ($\Omega\cdot\text{m}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Água + sal	1	0,1	56,2	177,8	23,9
	4	0,3	532,7	18,8	23,9
	2	1,1	2006	5	23,9
	5	4,1	7428	1,3	23,9
	3	10,2	17350	0,6	23,9
Água + sal + solo	1	0,1	56,9	175,7	23,4
	4	0,3	536	18,7	23,4
	2	1,1	2007	5	23,4
	5	4,1	7430	1,3	23,4
	3	10,2	17356,7	0,6	23,4

Legenda:

ppm: Partes por mil – equivalente a g/l.

A Figura 4.25 apresenta uma relação entre a condutividade elétrica das águas estudadas e suas respectivas salinidades.

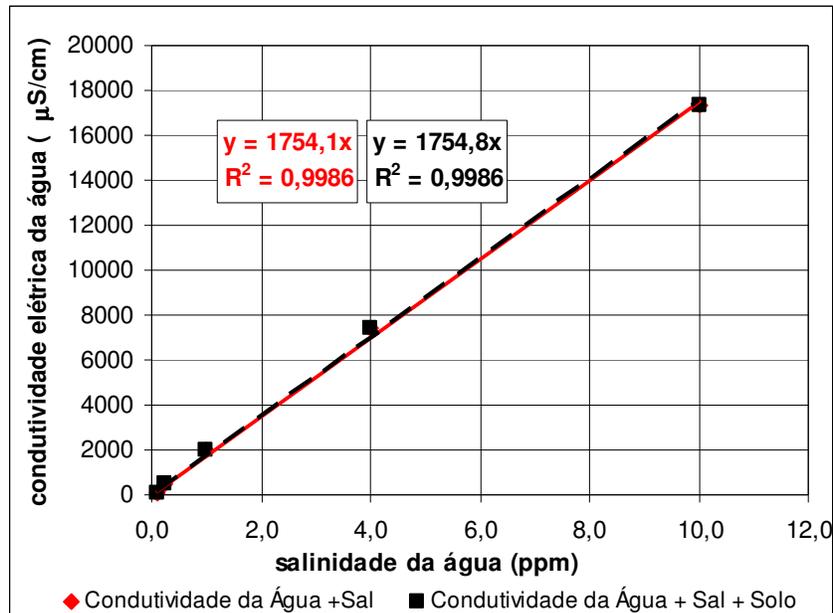


Figura 4.25 Relação entre a condutividade elétrica e salinidade para as águas estudadas.

Verifica-se na Figura 4.25 a existência de uma relação linear entre a salinidade e a condutividade da solução. Os resultados demonstram que a condução aumenta à medida que a quantidade de íons dissolvidos aumenta. Isso acontece porque quanto mais partículas carregadas existem em solução, mais elementos carregados estarão em deslocamento. Entretanto, é importante salientar que a taxa de variação entre a condutividade elétrica e a concentração do meio não pode ser tomada como verdadeiramente linear. Resultados apresentados na literatura demonstram que o comportamento segue uma tendência de saturação, ou seja, a taxa de variação da condutividade elétrica, para concentrações mais elevadas, vai se tornando cada vez menor. Isso provavelmente acontece porque em concentrações salinas muito elevadas começa a ocorrer choque entre os íons, o que leva à redução da mobilidade e conseqüentemente redução da capacidade de condução eletrolítica.

Pode se observar também na Figura 4.25 que a adição de solo às misturas de água + sal não alterou significativamente a condutividade elétrica das águas estudadas. Os resultados apresentados na Tabela 4.9 demonstram que também não houve alteração da salinidade destas misturas com a adição de solo na proporção estudada, demonstrando que a amostra estudada é uma amostra de solo não salina, característica essa geralmente encontrada nos solos tropicais altamente intemperizados do Centro-Oeste brasileiro.

A pequena variação dos valores de condutividade elétrica apresentados entre as medições feitas com as misturas de água + sal e água + sal + solo, pode estar relacionada à pequena variação de temperatura apresentada entre as misturas. Na Tabela 4.9 pode se

verificar que as misturas feitas com água + sal apresentaram temperaturas pouco mais elevadas, o que conseqüentemente afeta seus valores de condutividade elétrica, deixando-os pouco menores em relação às misturas de água + sal + solo. Como a temperatura e a viscosidade da água são grandezas inversamente proporcionais, o aumento de uma delas leva a redução da outra. Dessa maneira, o aumento da temperatura leva a uma maior mobilidade dos íons reduzindo, portanto, a resistividade do meio.

A Tabela 4.10 apresenta os índices físicos e os valores de resistividade elétrica dos 5 corpos de prova compactados utilizando-se as 5 soluções com diferentes salinidades. Os resultados apresentados na Tabela demonstram que os 5 corpos de prova compactados apresentaram características físicas muito semelhantes, estando estes praticamente com o mesmo índice de vazios, umidade e grau de saturação; o que possibilita uma análise comparativa entre eles.

Tabela 4.10 Valores dos índices físicos e resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com as águas de diferentes salinidades.

Corpo de prova	Salinidade da água (ppm)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	θ_w (%)	Sr (%)	Índice de vazios	Resistividade elétrica (Ω .m)
CP 1	0,1	16,29	18,2	30,2	78,7	0,625	4071,7
CP 4	0,3	16,29	18	29,9	77,6	0,627	507
CP 2	1,1	16,29	18	29,9	77,8	0,626	126,7
CP 5	4,1	16,29	18,2	30,2	78,6	0,627	31,7
CP 3	10,2	16,29	18,1	30	77,9	0,626	14,3

Legenda:

S_r: Grau de saturação

w: Teor de umidade gravimétrica

γ_d : Peso específico aparente seco

θ_w : Teor de umidade volumétrica

A Figura 4.26 apresenta a variação da resistividade elétrica dos corpos de prova frente a variação da salinidade da água utilizada, juntamente com a variação da resistividade elétrica da água frente a variação de sua salinidade.

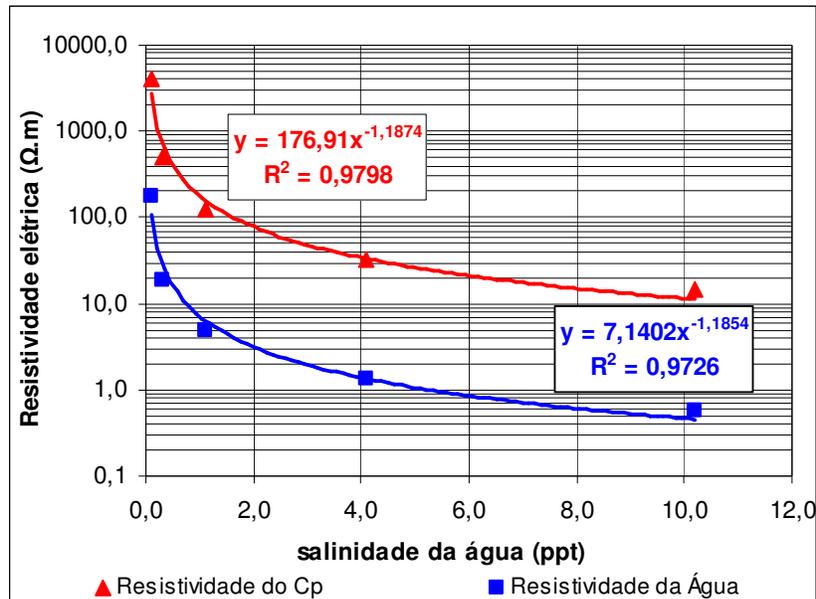


Figura 4.26 Comparação entre a variação da resistividade elétrica do corpo de prova e da água frente a variação da salinidade da água.

Verifica-se nesta figura que as curvas apresentaram bom coeficiente de determinação e que seguem praticamente paralelas com o aumento da salinidade da água. Este paralelismo está expresso pela semelhança entre os expoentes das equações. As curvas demonstram uma tendência de saturação do valor da salinidade, ou seja, para altos valores de salinidade a taxa de diminuição da resistividade elétrica tende a diminuir ou até mesmo estabilizar, o que corrobora com o exposto anteriormente.

O paralelismo destas curvas demonstra que, para a amostra estudada, o valor da resistividade elétrica apresentado pelo solo pode ser tomado como uma parcela do valor da resistividade elétrica apresentada pela água intersticial. Desta forma, dependendo da quantidade de água presente no solo, quando se varia a salinidade do líquido intersticial, a curva que representa a resistividade elétrica do corpo de prova estará mais ou menos deslocada em relação à curva que representa a resistividade do líquido.

Estes resultados levam a hipótese de que na amostra estudada, mantendo-se a mesma salinidade da água, o valor da resistividade elétrica do conjunto solo + ar + água será uma parcela do valor da resistividade do líquido intersticial, e essa parcela será tanto maior quanto maior for a quantidade de água presente no solo.

Pensando-se em termos de condutividade elétrica, para um entendimento mais claro do exposto, pode-se inferir que na relação entre condutividade elétrica do conjunto solo + ar + água e umidade volumétrica, quando a umidade volumétrica do solo for igual a 100%, ou seja, todo o volume for preenchido por água, a condutividade elétrica do conjunto será igual

ou aproximadamente igual à condutividade elétrica da água, logo, o valor da condutividade elétrica do conjunto será 100% o valor da condutividade elétrica da água intersticial. No entanto, esta variação não se dá de forma linear e sim de forma exponencial, como demonstra a Figura 4.27, que apresenta a variação da condutividade elétrica dos 20 corpos de prova compactados com a variação do teor de umidade volumétrica.

Nesta figura, utilizando a equação da curva de interpolação, verifica-se que se for atribuído à equação um valor de umidade volumétrica igual a 100%, o valor da condutividade elétrica do conjunto calculado será de 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$; valor este aproximadamente igual ao valor da condutividade elétrica da água de abastecimento (56,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) utilizada para a compactação dos corpos de prova (Tabela 4.9, solução número 1), corroborando com a hipótese feita.

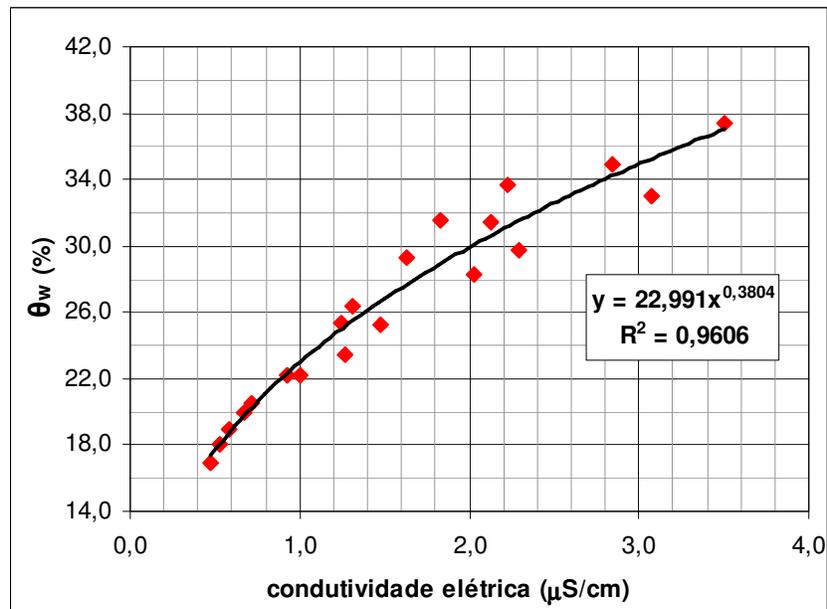


Figura 4.27 Teor de umidade volumétrica x condutividade elétrica.

Os resultados apresentados são do ponto de vista prático muito importantes, tendo em vista que os valores da resistividade elétrica dos corpos de prova se mostram muito influenciáveis pelo valor da salinidade da água, o que em campo, em uma eventual utilização da técnica em controle ou avaliação de maciços compactados, seria um problema. No entanto, como para a amostra estudada a variação da resistividade do corpo de prova com a variação da salinidade da água intersticial se mostrou “paralela” à variação da resistividade da água com a variação de sua salinidade, ou seja, que a relação entre a resistividade elétrica do corpo de prova e a resistividade elétrica da solução salina segue uma tendência linear (Figura 4.28),

a correção da resistividade do corpo de prova pela resistividade da água se mostra como uma boa alternativa.

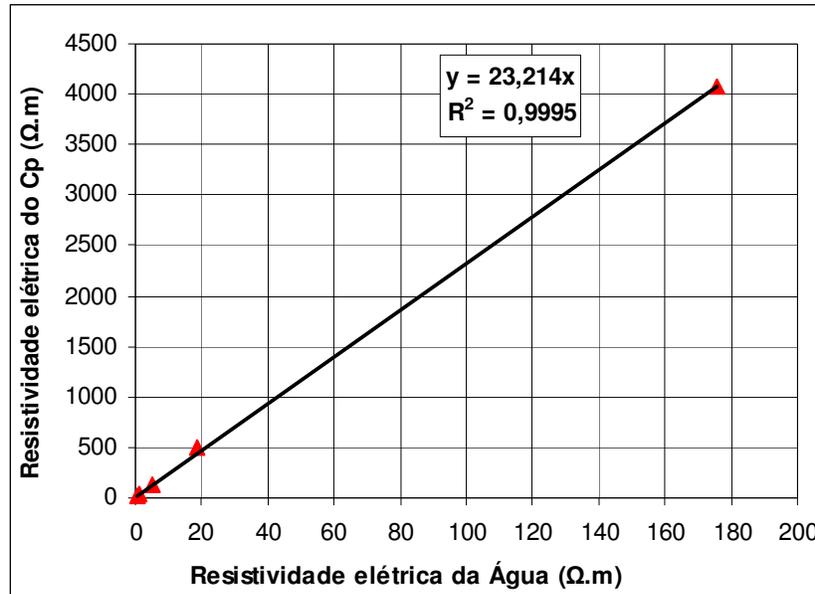


Figura 4.28 Relação entre a resistividade elétrica do corpo de prova e a resistividade elétrica da água.

A Tabela 4.11 apresenta os valores de resistividade elétrica medidos para os 5 corpos de prova moldados com as águas de diferentes salinidades e os valores das resistividades elétricas corrigidas em função da resistividade elétrica da água. A correção foi realizada multiplicando-se o valor de resistividade elétrica do corpo de prova por um fator de correção (Equação 4.4) para cada valor de resistividade elétrica da água, calculado por meio da Equação 4.5.

$$\rho_{CP-corrigida} = \rho_{CP} \cdot F_c \quad (4.4)$$

$$F_c = \left(\frac{\rho_{\text{água}CP} - \rho_{\text{água}padr\tilde{a}o}}{\rho_{\text{água}padr\tilde{a}o}} \right) + 1 \quad (4.5)$$

Onde:

F_c = fator de correção da resistividade elétrica do solo;

ρ_{CP} = resistividade elétrica do corpo de prova;

$\rho_{CP-corrigida}$ = resistividade elétrica do corpo de prova corrigida;

$\rho_{\text{água}CP}$ = resistividade elétrica da água intersticial do corpo de prova;

$\rho_{\text{água}padr\tilde{a}o}$ = resistividade elétrica da água padrão (neste caso = água de abastecimento).

Tabela 4.11 Correção da resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com as águas de diferentes salinidades.

Corpo de prova	Salinidade da água (ppm)	Resistividade elétrica do CP ($\Omega.m$)	Resistividade elétrica da água ($\Omega.m$) ¹	Fator de correção	Resistividade elétrica do CP corrigida ($\Omega.m$)
CP 1	0,1	4071,7	175,7	1	4071,7
CP 4	0,3	507	18,7	9,4	4775,8
CP 2	1,1	126,7	5	35,3	4470,6
CP 5	4,1	31,7	1,3	130,6	4137,6
CP 3	10,2	14,3	0,6	305	4349,5

(1): Valores de resistividade elétrica da mistura água + sal + solo

Os resultados apresentados na Tabela 4.11 demonstram que a correção da resistividade elétrica do corpo de prova em função da resistividade do líquido intersticial faz com que os valores de resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com águas em diferentes salinidades sejam praticamente os mesmos quando corrigidos para um valor padrão de resistividade do líquido intersticial, como pode ser observado na Figura 4.29.

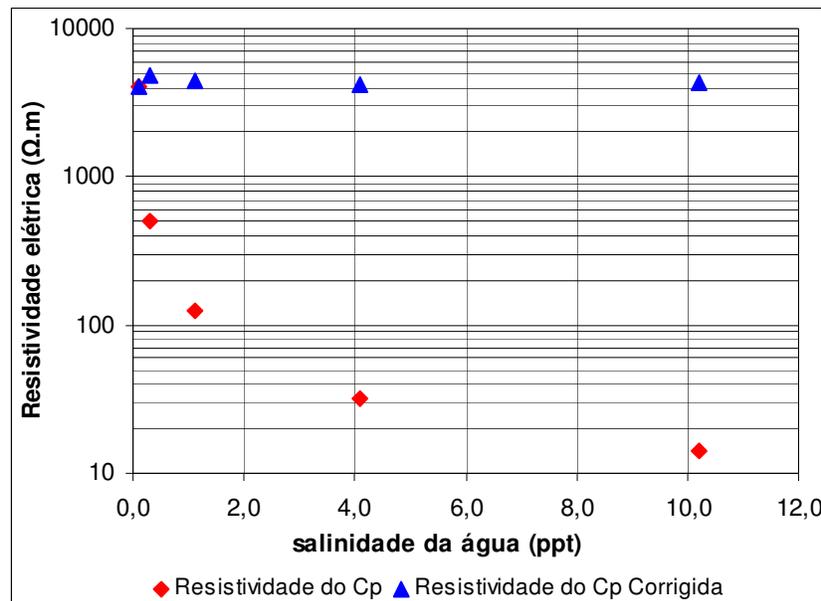


Figura 4.29 Comparação entre a variação da resistividade elétrica corrigida e da não corrigida dos corpos de prova frente a variação da salinidade da água.

Estes resultados são do ponto de vista prático, extremamente interessantes quando se pensa na utilização da técnica de eletroresistividade em campo como controle e avaliação de maciços compactados. Em campo, a água utilizada para o processo de compactação do maciço é muito diferente da comumente utilizada em laboratório. Estas águas são geralmente

captadas em mananciais locais, o que pode resultar em águas com salinidades diferentes em cada trecho de maciço compactado.

É importante salientar que no caso desta pesquisa, onde tem-se um solo com salinidade desprezível, a alteração da salinidade do líquido, pela mistura com o solo em varias proporções, não foi avaliada, sendo a correção da resistividade do solo em função da resistividade da água feita para um valor de resistividade elétrica da água encontrada em uma diluição solo-água pré estabelecida.

No entanto, em um solo com salinidade considerável, a concentração do líquido intersticial varia segundo sua umidade. Para uma mesma densidade aparente seca, quanto maior é a umidade do solo, menor é a concentração de seu líquido intersticial. Sendo assim, para se fazer o processo de correção da resistividade elétrica do solo em função da resistividade elétrica do líquido, é necessário avaliar como essa resistividade do líquido varia com sua concentração salina.

Destaca-se que os resultados discutidos anteriormente demonstram que apesar dessa relação se mostrar em primeiro momento linear, para altos valores de concentração, ela pode ter seu comportamento alterado.

4.5 ENSAIOS PARA A DEFINIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

Neste item são apresentadas as curvas características dos corpos de prova compactados em cilindro de 6", obtidas pela técnica do papel filtro. É importante ressaltar aqui que os ensaios de curva característica, assim como os processos de secagem e umedecimento, foram executados em 16 dos 20 corpos de prova compactados, não sendo realizado tais ensaios nos corpos de prova 1N, 1M, 3M e 6M. Nos três primeiros pela dificuldade de talhagem e moldagem dos corpos de prova de 2" e no último, por este possuir umidade e densidade coincidente ao corpo de prova 6I.

As Figuras 4.30 a 4.32 apresentam as curvas características de retenção de água referentes à sucção matricial em função do grau de saturação. As Figuras 4.33 a 4.35 apresentam a comparação entre estas curvas características para cada energia de compactação.

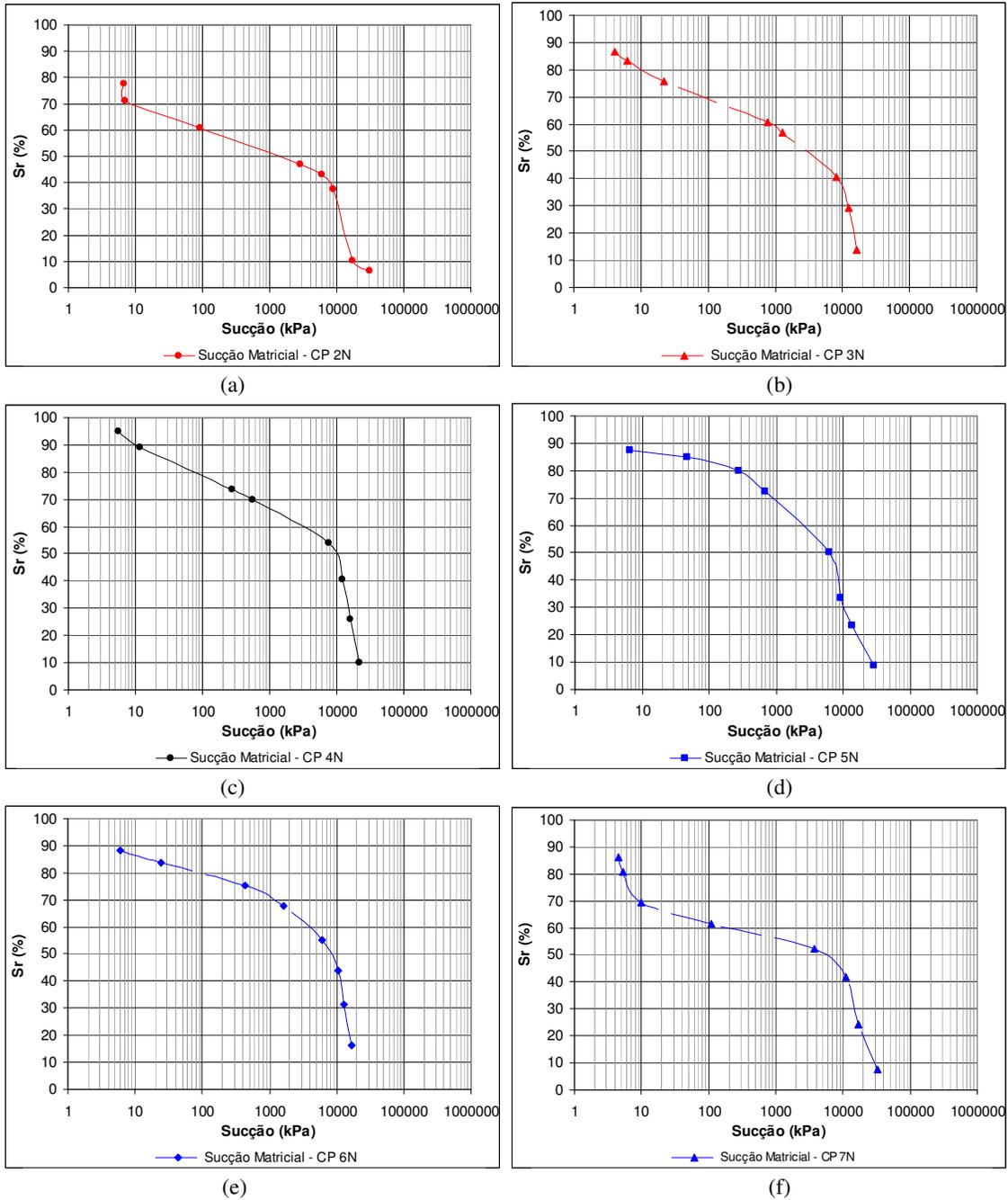
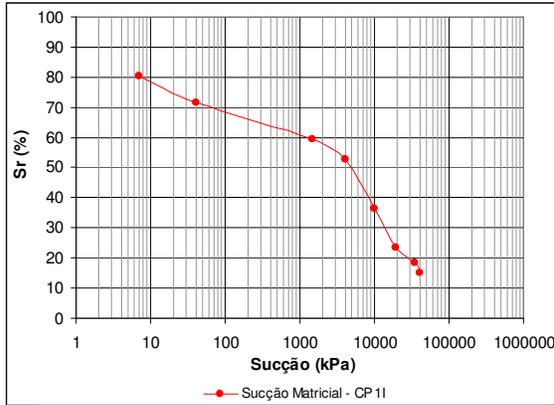
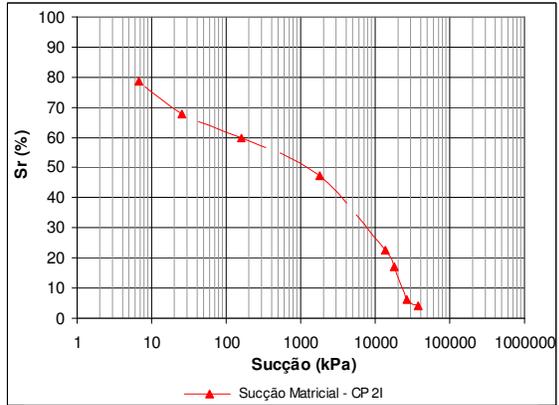


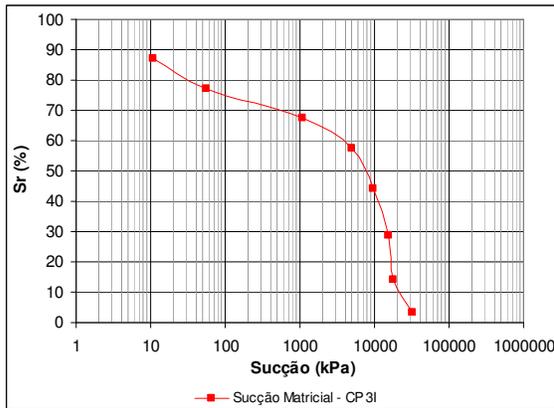
Figura 4.30 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 2N, b) CP 3N, c) CP 4N, d) CP 5N, e) CP 6N, f) CP 7N.



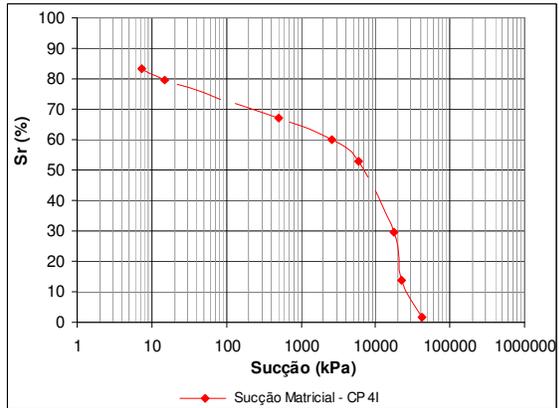
(a)



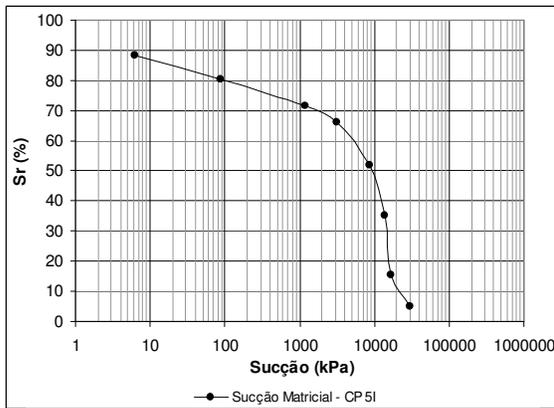
(b)



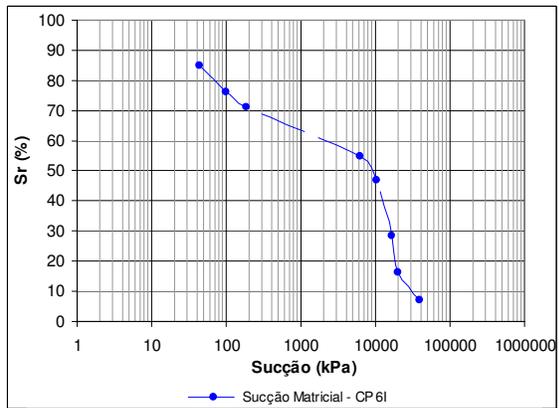
(c)



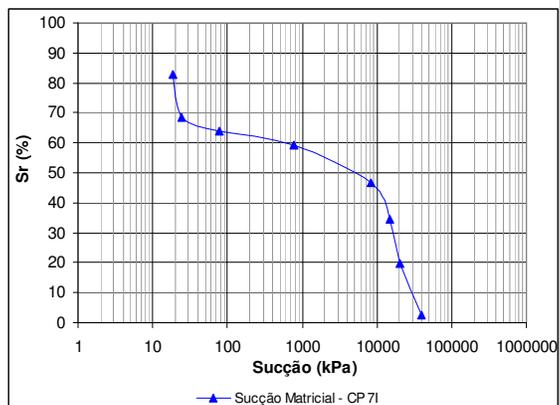
(d)



(e)

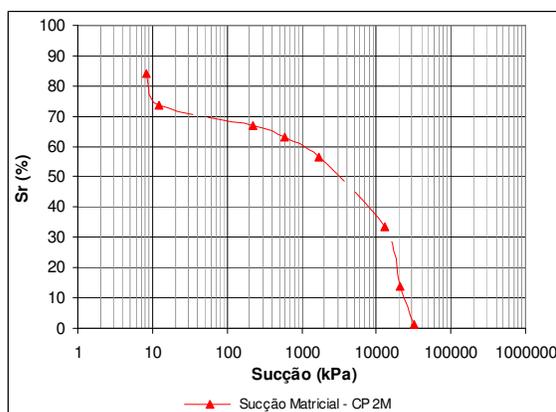


(f)

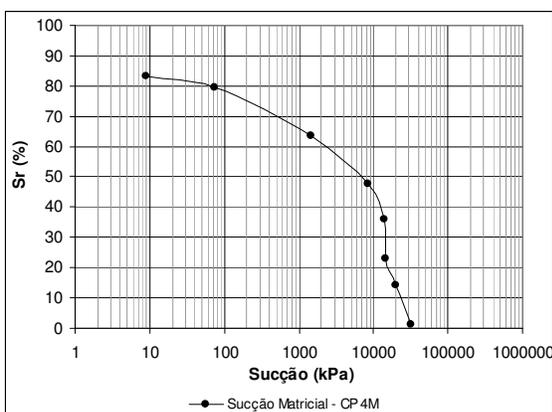


(g)

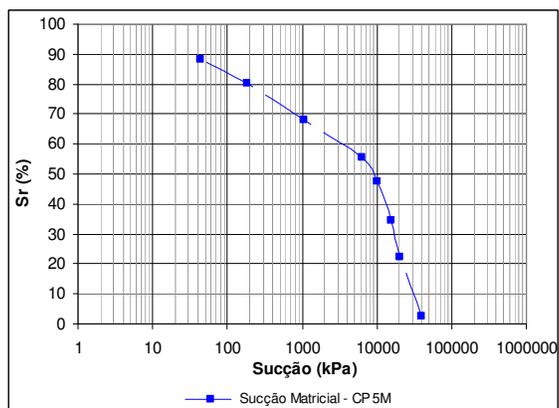
Figura 4.31 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.32 Curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 2M, b) CP 4M, c) CP 5M.

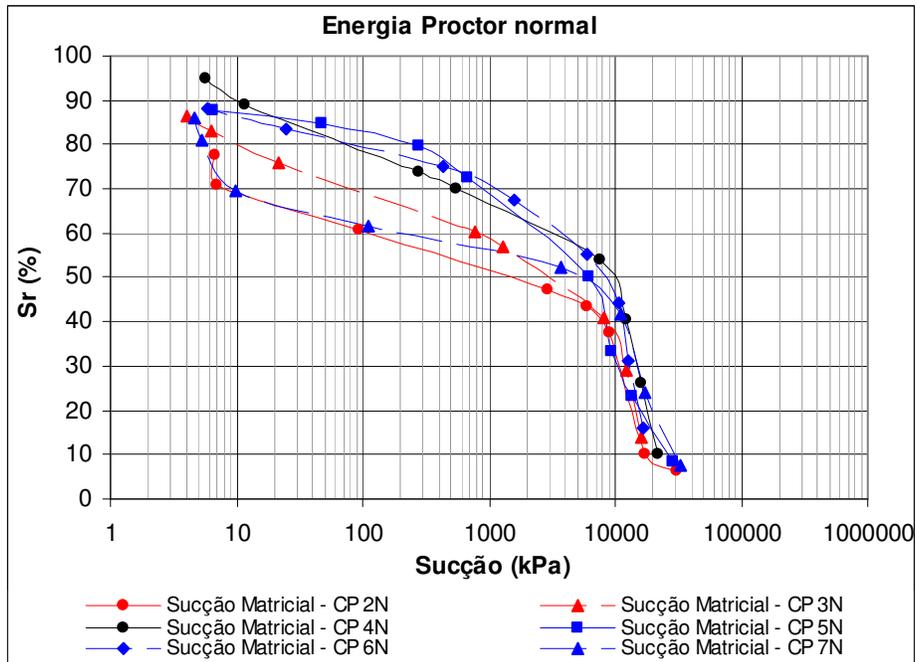


Figura 4.33 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor normal.

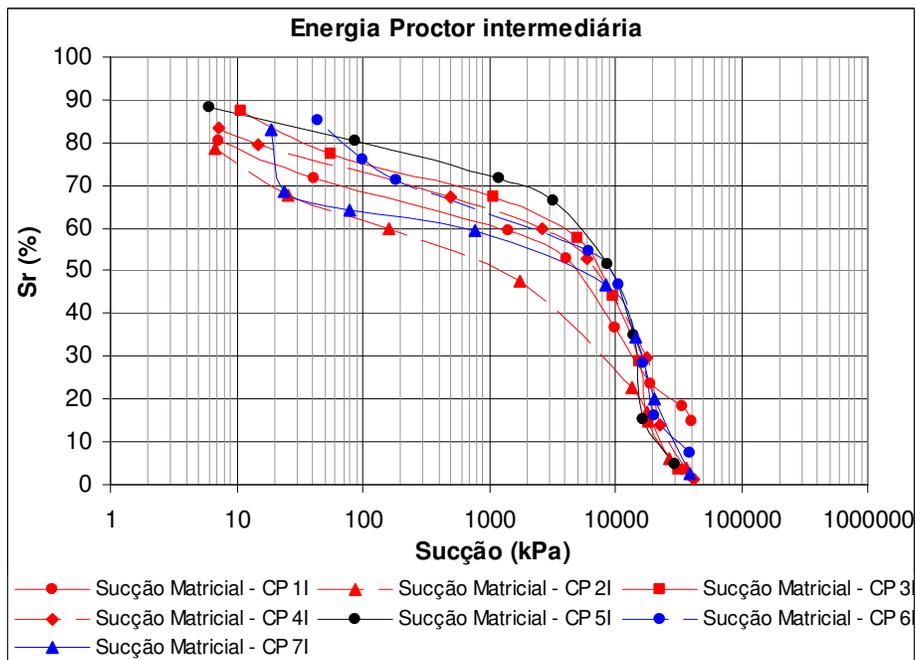


Figura 4.34 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor intermediária.

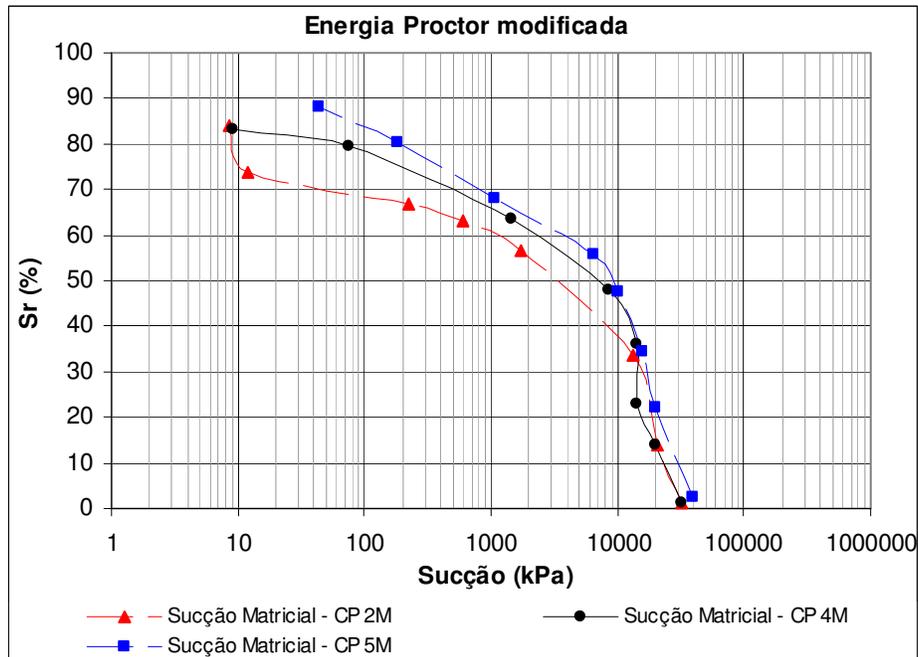


Figura 4.35 Comparação entre as curvas características - sucção x grau de saturação – corpos de prova energia Proctor modificada.

Segundo Aubertin *et al.* (1998), o formato da curva característica depende do tipo de solo e do tamanho e distribuição de seus poros. Os autores discutem que o ponto de entrada de ar, neste caso nos macroporos, situa-se geralmente entre 0,2 e 1 kPa em areias grossas, 1 e 3,5 kPa em areias médias, 3,5 e 7,5 kPa em areias finas, 7 e 25 kPa em siltes e acima de 25 kPa em argilas. No entanto, Camapum de Carvalho & Leroueil (2004) mostram que, em solos tropicais profundamente intemperizados, com presença de agregações, a curva característica apresenta comportamento bimodal, ou seja, dois pontos de entrada de ar, um referente aos macroporos, e outro referente aos microporos, que neste caso se situaria em torno de 10.000 kPa.

Segundo Camapum de Carvalho & Leroueil (2000), a distribuição bimodal de poros nos solos tropicais é devido ao intemperismo e à acidez, que são responsáveis pela formação de agregações de partículas cimentadas ou não por óxido e hidróxidos de alumínio e/ou ferro, que por sua vez se ligam uma às outras, seja por estes mesmos cimentos ou por pontes de argila. Os autores ressaltam que até o ponto de entrada de ar nos macroporos, a variação do grau de saturação do solo é pequena. Ao ser atingido este ponto observa-se grandes variações do grau de saturação para pequenas variações de sucção até se atingir o ponto correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos, onde ocorre um aumento significativo da sucção até atingir o ponto de entrada de ar nos microporos.

Verifica-se nas Figuras 4.30 a 4.35, o não aparecimento da entrada de ar nos macroporos para a amostra estudada, o que já era esperado, visto que a técnica do papel filtro se mostra pouco eficiente para medições de sucção nesta faixa, em amostras solo maduro altamente intemperizado. No entanto, analisando essas mesmas figuras percebe-se para alguns corpos de prova (CP - 2N, CP - 7N, CP - 7I e CP - 2M) uma tendência da curva de apresentar uma inflexão (término da entrada de ar nos macroporos) para uma sucção de 10 kPa. Considerando-se os dados texturais descritos no item 4.1.1, que definem a amostra do solo Noroeste como sendo uma areia argilosa, este valor corrobora os resultados apresentados por Aubertin *et al.* (1998).

Nas Figuras 4.30 a 4.35 verifica-se que, em todas as condições de moldagem, as curvas características apresentam uma inflexão (entrada de ar nos microporos) em torno de 60% de grau de saturação, o que representa valores de sucção situados entre 8000 e 10000 kPa, corroborando com o apresentado por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004).

Analisando-se as curvas características obtidas para os 16 corpos de prova, sob o aspecto de forma, pode-se verificar nas Figuras 4.33 a 4.35 que estas apresentam características bastante semelhantes. Pode se observar ainda nas Figuras 4.33 a 4.35 que a curvatura do ponto de entrada de ar nos microporos vai se acentuando a medida que a densidade do solo aumenta, demonstrando que a compactação do solo afeta de maneira significativa o comportamento da curva característica na amostra estudada.

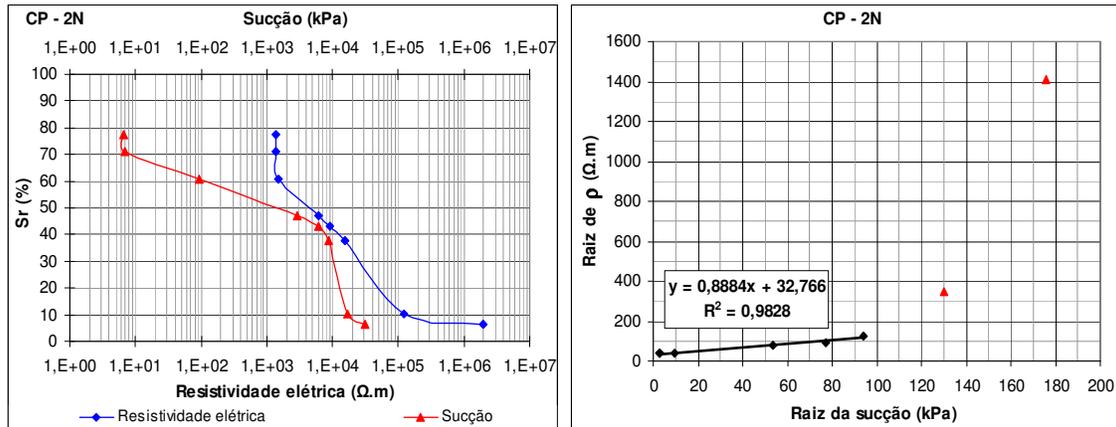
4.5.1 Comparação Entre a Resistividade Elétrica e Sucção Matricial

Neste item é apresentado um estudo comparativo entre os valores de resistividade elétrica e de sucção matricial obtidos nos corpos de prova de 2" submetidos aos processos de secagem e umedecimento e ensaios de papel filtro.

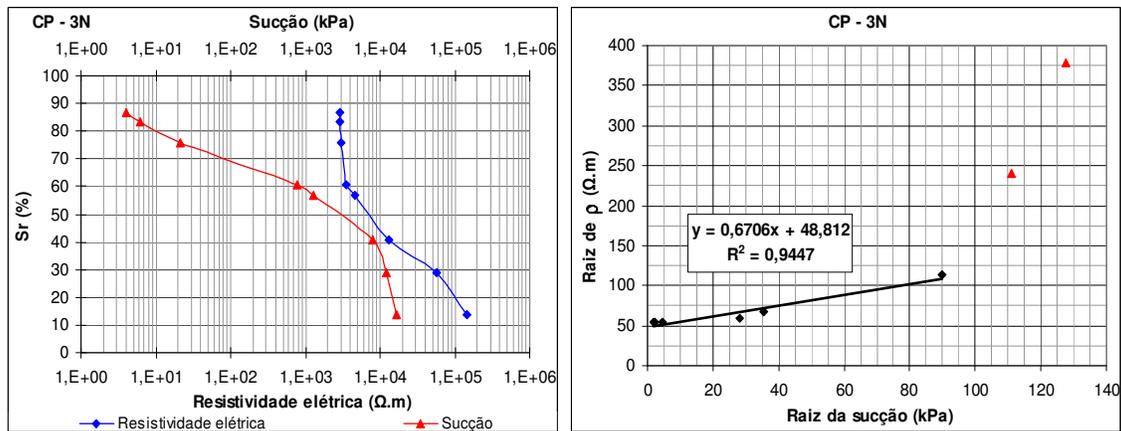
As Figuras 4.36 a 4.38 apresentam a sobreposição das curvas características de retenção de água referentes à sucção matricial, em função do grau de saturação, com a curva da variação da resistividade elétrica com o grau de saturação do solo; além de uma relação direta entre os valores de resistividade elétrica e sucção matricial para cada corpo de prova submetido ao processo de secagem e umedecimento e ensaios de papel filtro, para as 3 energias de compactação utilizadas.

Destaca-se aqui que para melhorar a escala dos gráficos que relacionam os valores de resistividade elétrica e sucção matricial, tendo em vista que os valores de resistividade elétrica serem numericamente muito superiores aos valores de sucção matricial, optou-se ao invés de

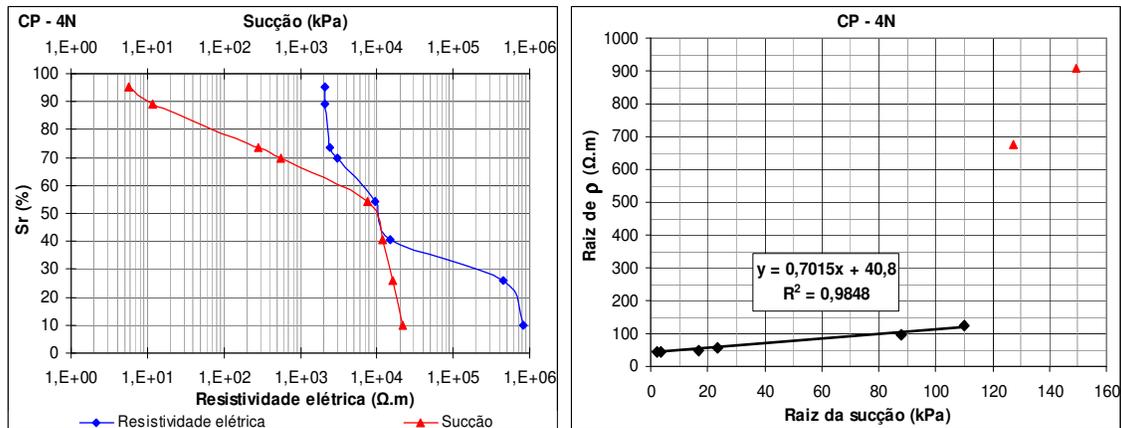
se trabalhar com a escala log-log, por plotar tanto nos eixos das abscissas quanto nos eixos das ordenadas os valores da raiz quadrada da resistividade elétrica e da sucção matricial, visto que a escala log-log neste caso não permitiria o traçado de uma equação linear dos trechos onde apresentam esse comportamento.



(a)



(b)



(c)

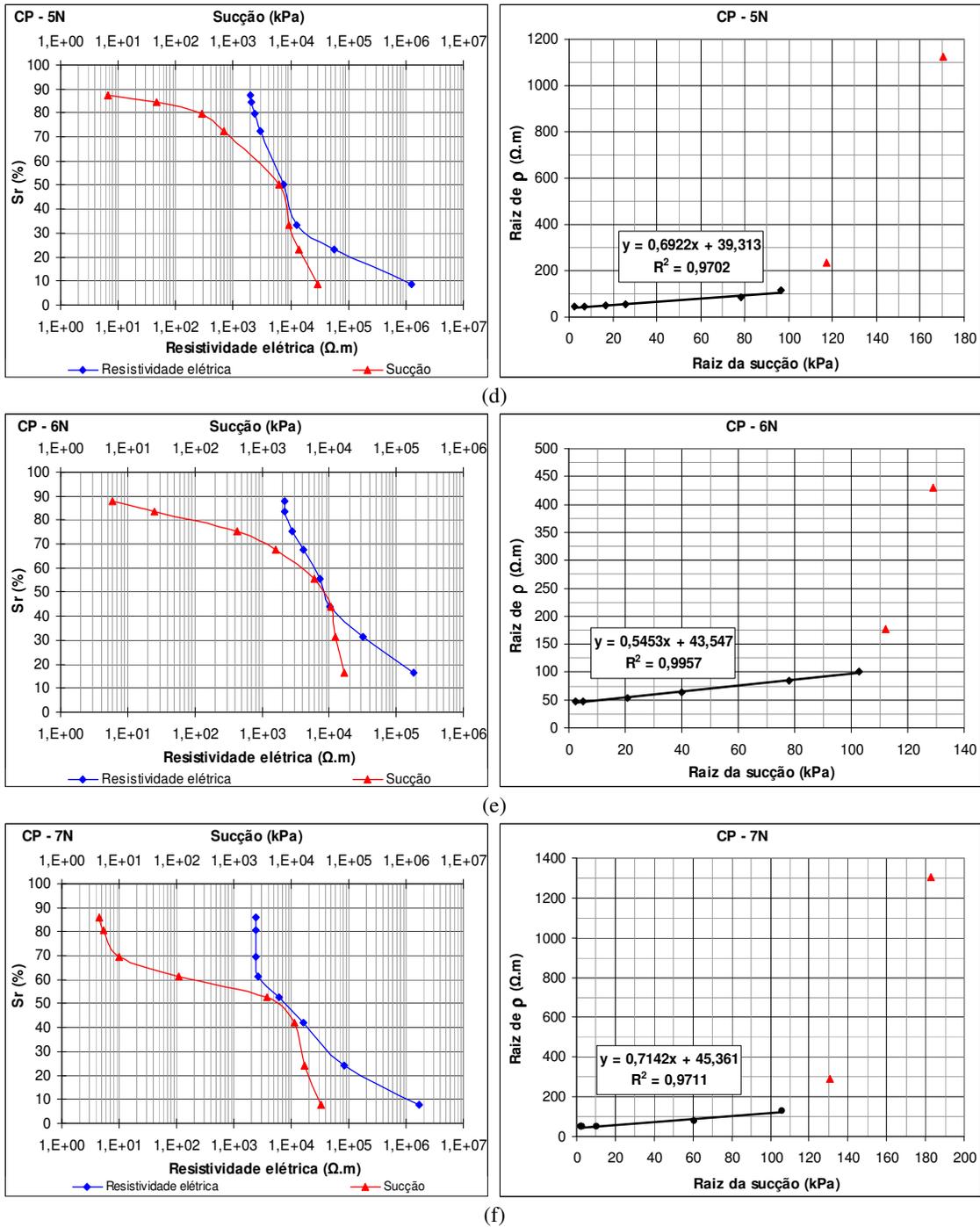
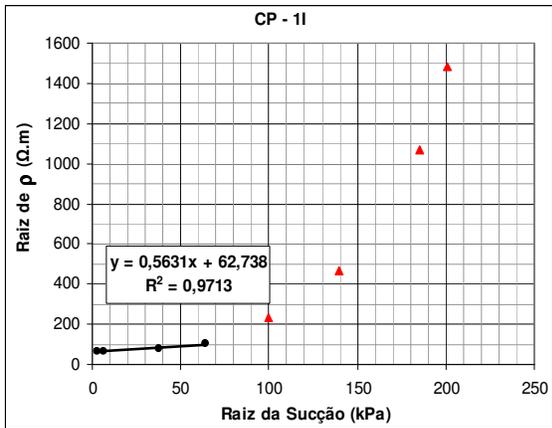
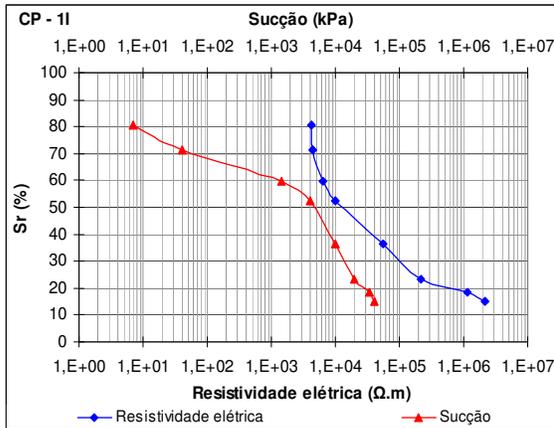
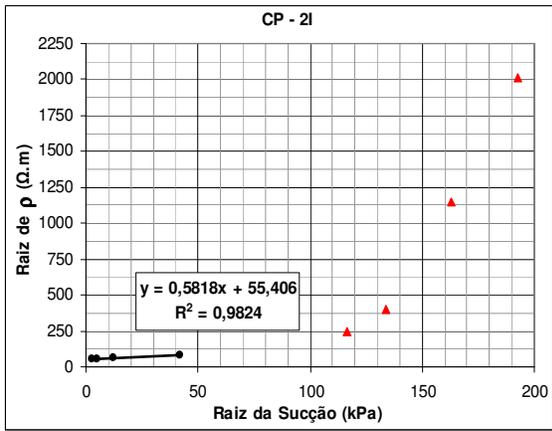
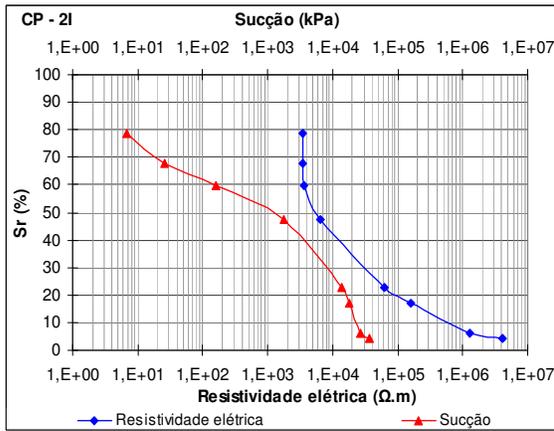


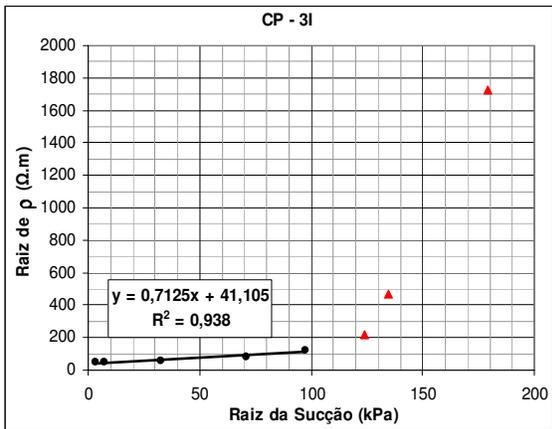
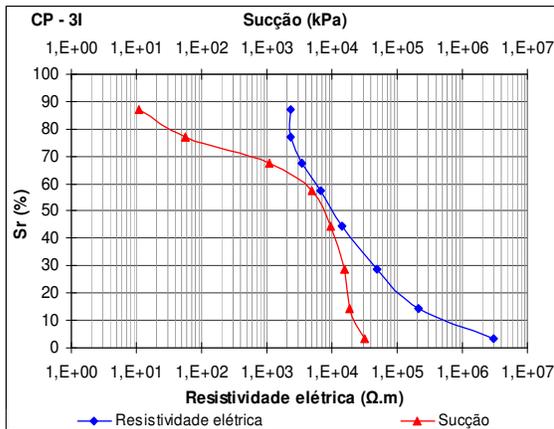
Figura 4.36 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor normal: a) CP 2N, b) CP 3N, c) CP 4N, d) CP 5N, e) CP 6N, f) CP 7N.



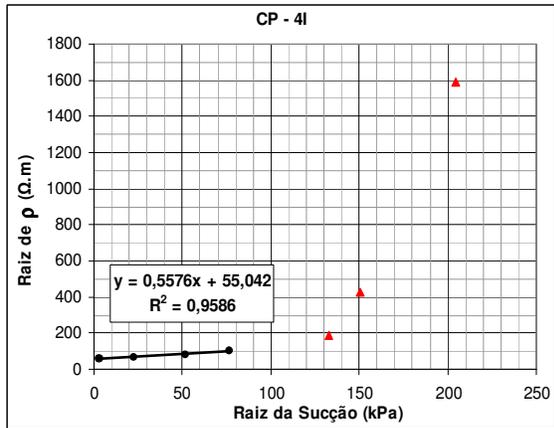
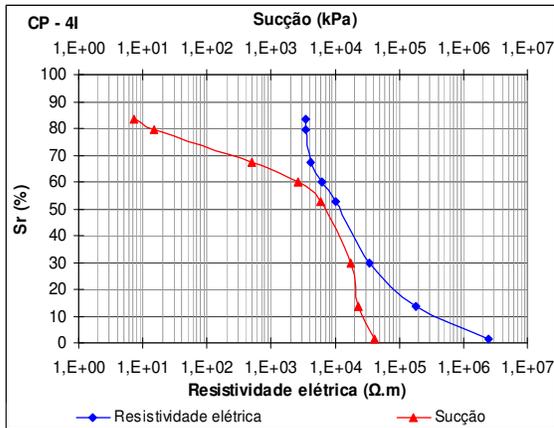
(a)



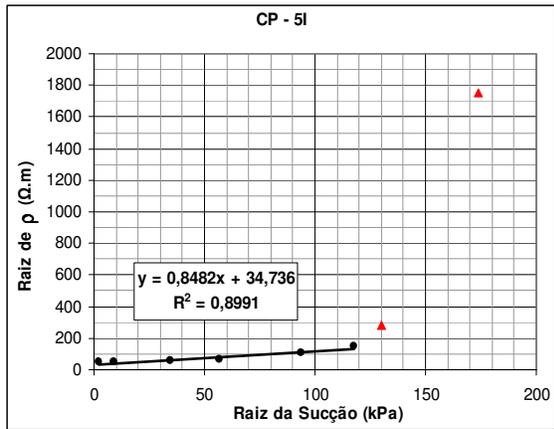
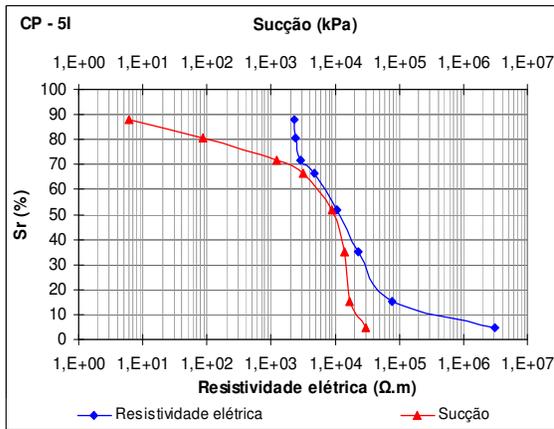
(b)



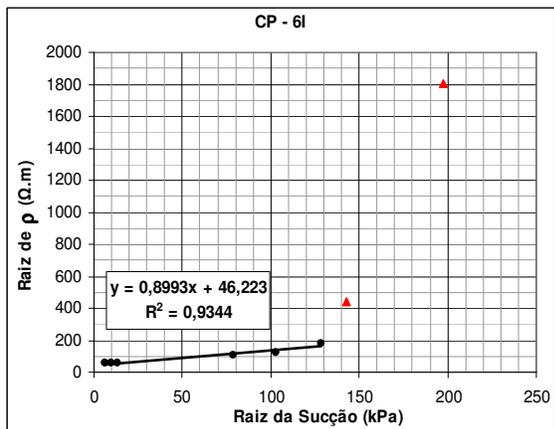
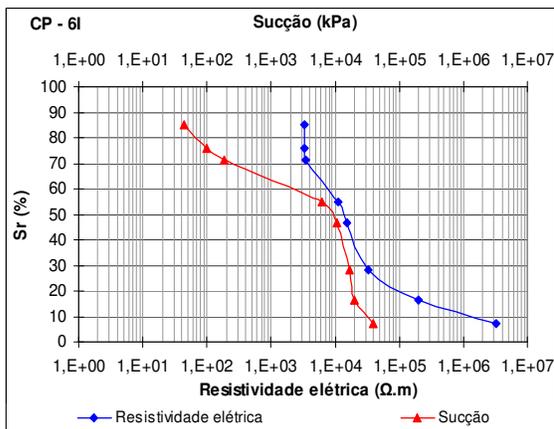
(c)



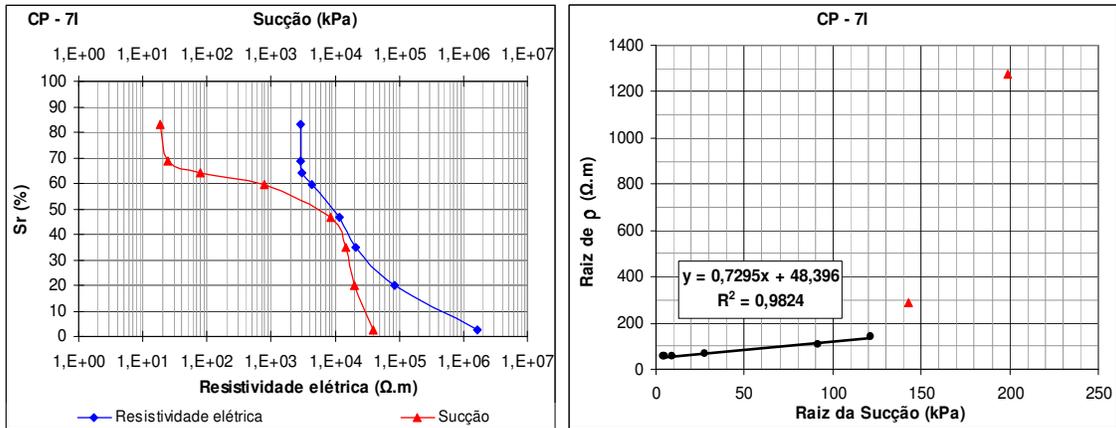
(d)



(e)

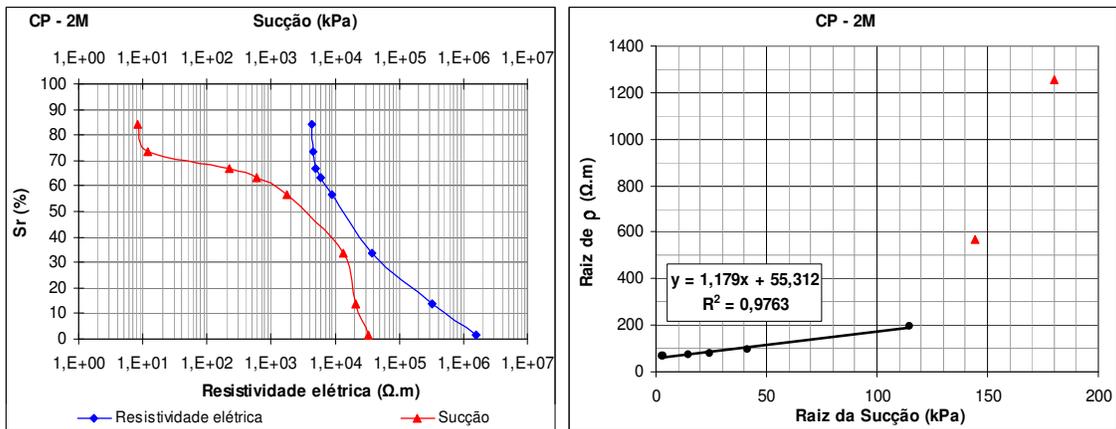


(f)

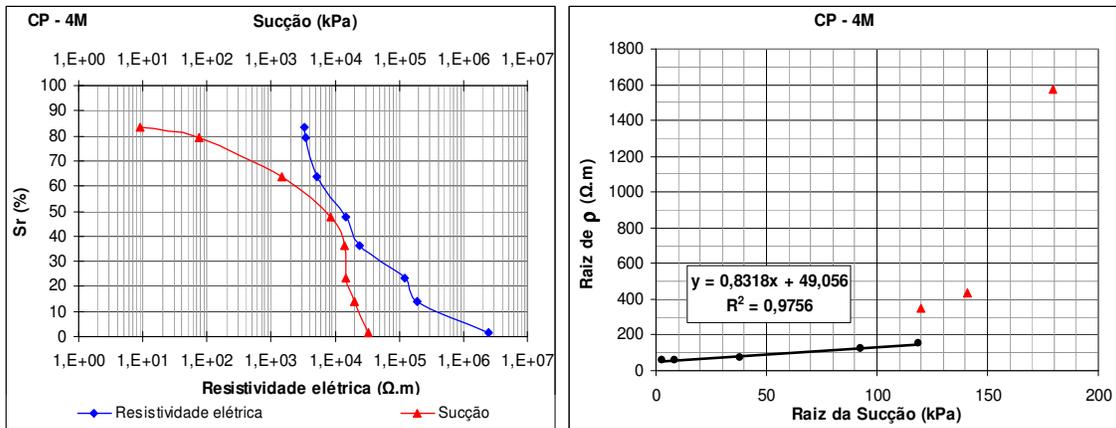


(g)

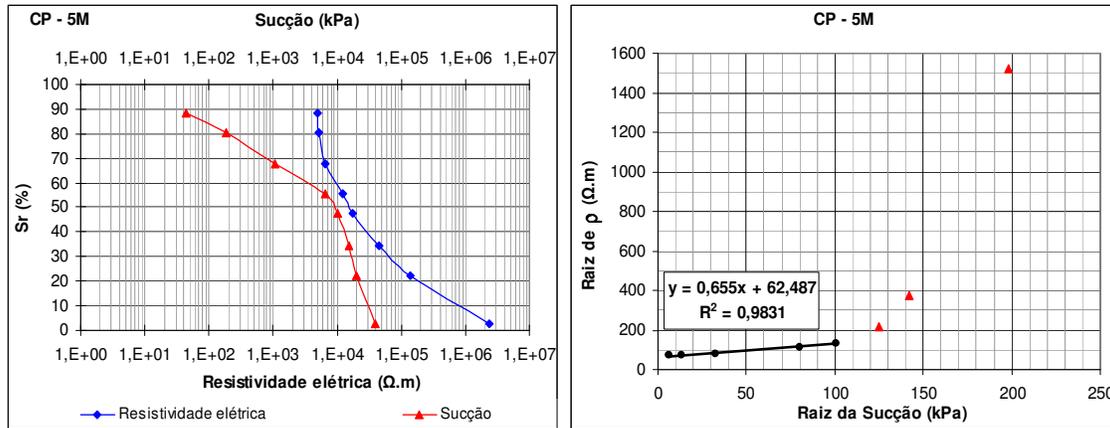
Figura 4.37 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor intermediária: a) CP 1I, b) CP 2I, c) CP 3I, d) CP 4I, e) CP 5I, f) CP 6I, g) CP 7I.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.38 Comparação entre resistividade elétrica e sucção matricial – corpos de prova energia Proctor modificada: a) CP 2M, b) CP 4M, c) CP 5M.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.36 a 4.38 demonstram que, para todos os corpos de prova analisados neste item, independente da energia de compactação, a relação entre resistividade elétrica e sucção matricial apresenta dois comportamentos distintos. Nestes resultados verifica-se a existência de uma relação direta e linear entre a raiz quadrada da resistividade elétrica e a raiz quadrada da sucção matricial no trecho situado antes do valor de sucção correspondente ao valor de entrada de ar nos microporos da amostra. Após este ponto, os valores de resistividade aumentam substancialmente e a relação entre a raiz quadrada da resistividade elétrica e a raiz quadrada da sucção matricial passa a apresentar outro comportamento.

Estes resultados são importante para o entendimento do comportamento da resistividade elétrica da amostra estudada frente a variação de seu grau de saturação. No solo, antes do início da entrada de ar nos microporos, existem caminhos de águas conectados que, além de responsáveis pela existência da sucção matricial na amostra pelos efeitos capilares, facilitam a condução de corrente elétrica por meio da eletrólise.

Com a diminuição do grau de saturação do solo, o potencial de condução eletrolítica do meio vai diminuindo cada vez mais o que aumenta sua resistividade elétrica, o mesmo acontece com a sucção matricial do solo. Desta forma, até este ponto, a relação entre estas duas grandezas tende a permanecer linear, tendo em vista que ambas dependem dos mesmos mecanismos, ou seja, a quantidade de água nos vazios do solo.

Quando começa a ocorrer a entrada de 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 isto não é valido. A entrada de ar nos microporos representa a perda da continuidade dos caminhos de água no solo, o que coloca o

fenômeno de condução eletrolítica em segundo plano. Se for considerada que a condução elétrica no solo depende de sua quantidade de água nos poros e que a água presente nos microporos não favorece a condução eletrolítica, tendo em vista que, em sua maioria, não está conectada, a dessaturação dos macroporos do solo promove um aumento brusco da resistividade elétrica dos mesmos, o que pode ser observado em todas as figuras apresentadas anteriormente.

4.6 AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DAS AMOSTRAS FRENTE AOS PROCESSOS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO

Os resultados apresentados neste item buscam avaliar o comportamento da resistividade elétrica do material compactado frente às trajetórias de secagem e umedecimento. Este estudo tem por objetivo avaliar se corpos de prova compactados em uma mesma densidade, mas em diferentes condições de compactação (ramo seco, ramo úmido e energias diferentes), quando submetidos a trajetórias de secagem e/ou umedecimento, apresentam o mesmo comportamento quanto a resistividade elétrica.

Para isto foram realizadas comparações entre as curvas que representam a variação da resistividade elétrica do material com a variação de sua umidade volumétrica, em corpos de prova pertencentes a uma mesma linha de iso-índice de vazios. Trabalhou-se aqui apenas com a variação da resistividade elétrica x variação da umidade volumétrica, tendo em vista que nas análises feitas até então esta foi a característica física do solo que melhor se relacionou à resistividade elétrica.

As Figuras 4.39 a 4.42 apresentam a variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento dos corpos de prova de índice de vazios iguais a 0,700; 0,640; 0,608; e 0,550, respectivamente.

Nos resultados apresentados na Figura 4.39 verifica-se um comportamento semelhante entre as curva referentes aos corpos de prova 6N E 2N. No entanto, a curva referente ao corpo de prova 1I encontra-se deslocada em relação as demais, apresentando valores de resistividade elétrica mais elevados para uma mesma umidade volumétrica. Este fato pode estar relacionado à maior quebra das agregações promovida pela maior energia de compactação utilizada neste ponto, a quebra destas agregações promove um aumento da superfície específica de solo presente no todo, o que apesar da quantidade de água ser a mesma pode estar atrapalhando com maior intensidade o processo de condução eletrolítica da água intersticial.

Entretanto, os resultados apresentados nas Figuras 4.40 a 4.42 demonstram que as curvas utilizadas, independente da condição de compactação ou até mesmo da energia de compactação, apresentam o mesmo comportamento estando quase que sobrepostas. Este comportamento é mais condizente com o apresentado nesta dissertação e mais uma vez demonstra que o principal fator condicionante da resistividade elétrica da amostra estudada é o teor de umidade volumétrica.

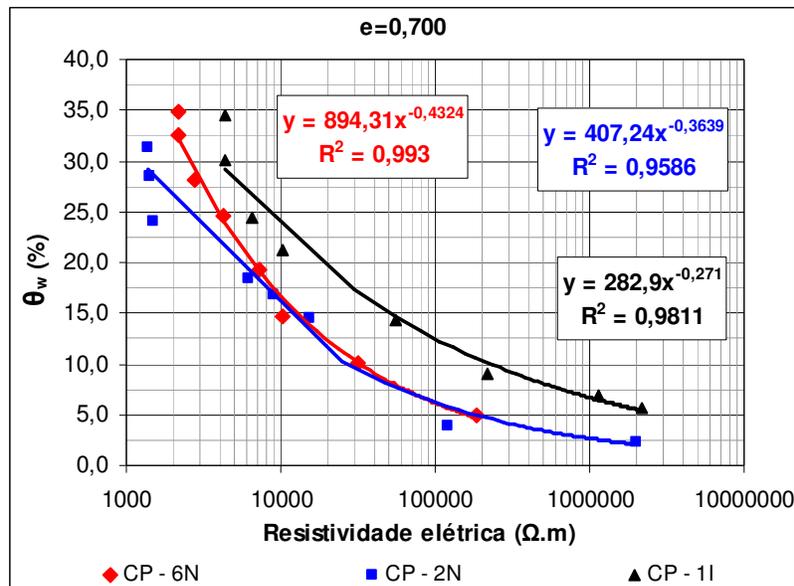


Figura 4.39 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,700: CP 6N, CP 2N, CP 1I.

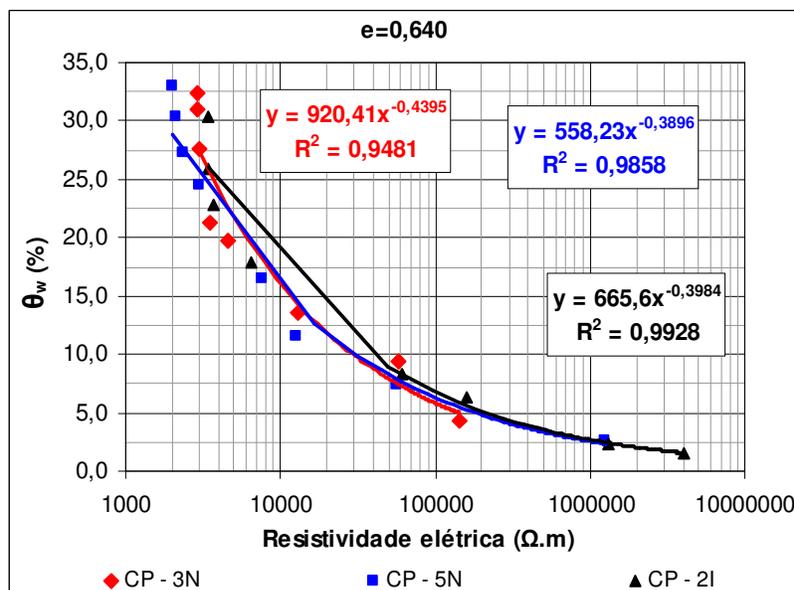


Figura 4.40 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,640: CP 3N, CP 5N, CP 2I.

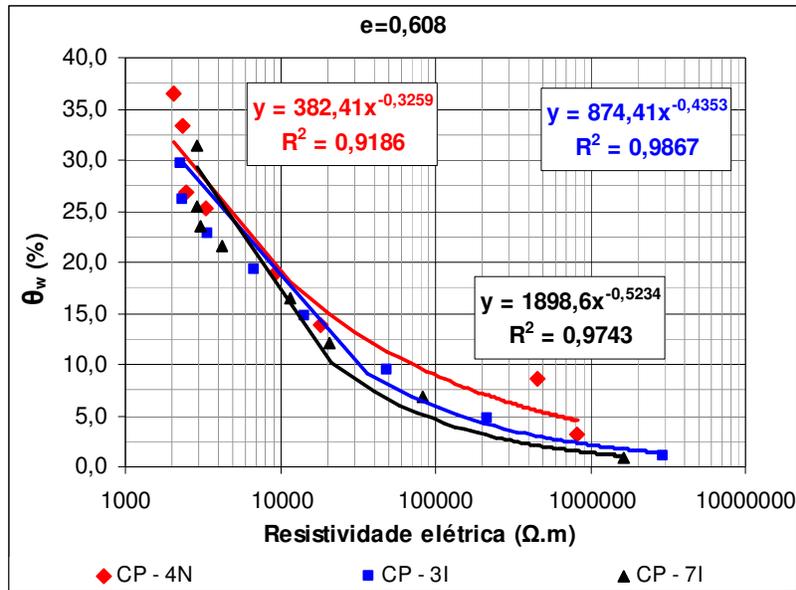


Figura 4.41 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,608: CP 4N, CP 3I, CP 7I.

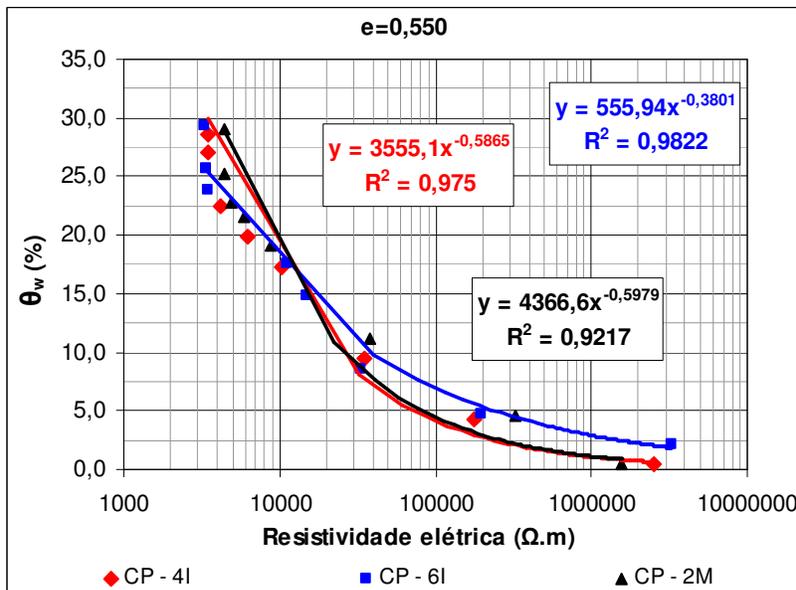


Figura 4.42 Variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica no processo de secagem e umedecimento – corpos de prova de índice de vazios igual a 0,550: CP 4I, CP 6I, CP 2M.

De acordo com Lambe (1969), para baixos teores de umidade, ou seja, no ramo seco da curva de compactação, o solo adquire um arranjo dos grãos semelhantes aos das estruturas floculadas. Isso porque, nessas condições, há forças atrativas entre as partículas que as ligam entre si, cantos ou arestas contra faces, formando flocos que são indestrutíveis pelas energias comumente utilizadas na compactação. Com o aumento da umidade, há um aumento das forças de repulsão, o que favorece a orientação das partículas. No ramo úmido, com o

aumento excessivo da umidade, continua a ocorrer aumento nas forças de repulsão, levando a uma estrutura cada vez mais dispersa, e com o surgimento de pressões neutras positivas tem-se a diminuição da energia efetiva de compactação e, por consequência, a diminuição do peso específico.

A sobreposição das curvas apresentadas nas Figuras 4.40 a 4.42 indica que a variação da estrutura do solo, como exposto por Lambe (1969), não afeta, para a amostra estudada, o comportamento da resistividade elétrica. No entanto, é importante destacar que todo o exposto pelo autor só é válido para os solos de regiões temperadas ou tropicais, ainda pouco intemperizados. Para os solos profundamente intemperizados, como é o caso da amostra estudada nesta dissertação, como as partículas se encontram agregadas, esse efeito da compactação na estrutura do solo tende a desaparecer dando lugar a estruturas semelhantes às daquelas dos solos granulares, o que tende a promover a formação de estruturas semelhantes independente do ramo da curva de compactação. Desta forma, a semelhança entre a curva que representa a variação da resistividade elétrica com a variação de seu teor de umidade volumétrica independente da condição de compactação se explica.

4.6.1 Relação Entre Resistividade Elétrica e Teor de Umidade Volumétrica, Comparação Entre os Copos de Prova de 6” e 2”

Neste item é apresentada, por meio da Figura 4.43, uma comparação entre a variação da resistividade elétrica com a variação do teor de umidade volumétrica obtida para os corpos de prova de 6” e os corpos de prova de 2” do processo de secagem e umedecimento. A Figura 4.44 apresenta estes mesmos resultados em uma faixa de resistividade menor, condizente com os valores medidos nos corpos de prova de 6”. Destaca-se que aqui mais uma vez foi utilizado no eixo da ordenada o valor da raiz quadrada da resistividade elétrica no lugar da escala log para uma melhor visualização dos resultados.

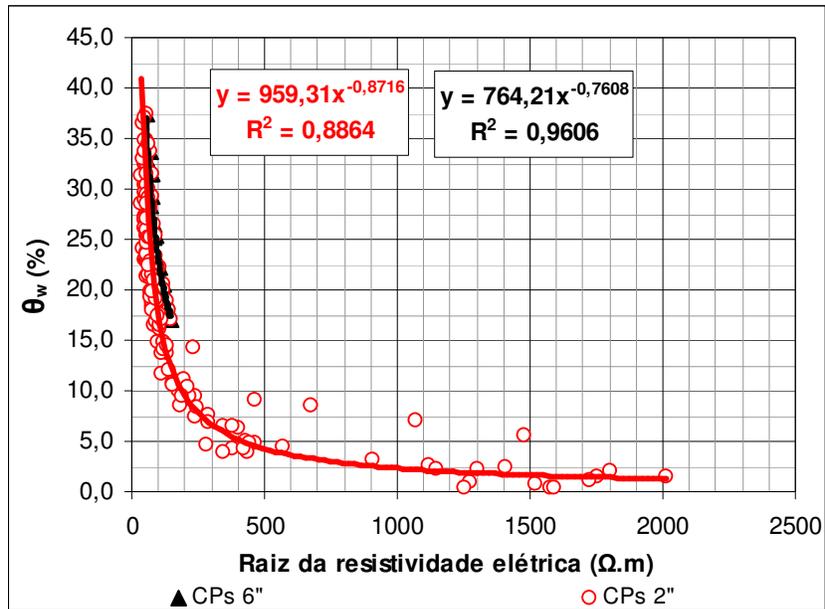


Figura 4.43 Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrica - comparação entre os copos de prova de 6'' e 2''.

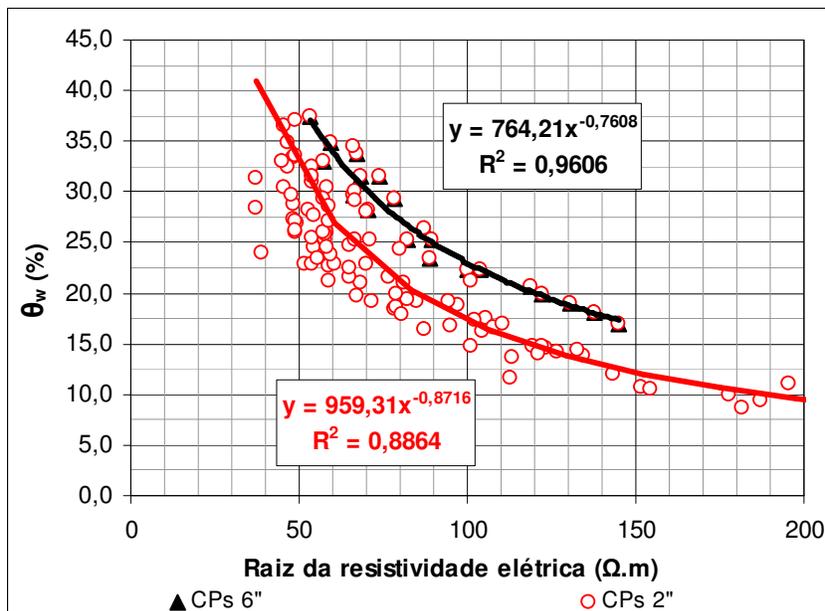


Figura 4.44 Relação entre resistividade elétrica e teor de umidade volumétrica - comparação entre os copos de prova de 6'' e 2'' - faixa de resistividade menor.

Verifica-se nos resultados apresentados nas Figuras 4.43 e 4.44 uma boa relação entre a resistividade elétrica e o teor de umidade volumétrica para os corpos de prova de 2'', estando o coeficiente de determinação desta relação próximo de 0,9. Verifica-se também nessas figuras um distanciamento entre as curvas referentes aos corpos de prova de 6'' e 2'', sendo

que para uma mesma umidade volumétrica os corpos de prova de 6” apresentam valores de resistividade elétrica superiores.

Este distanciamento provavelmente está associado a um fator de forma dos corpos de prova utilizados, indicando que as dimensões dos corpos de prova influenciam nos resultados de resistividade elétrica. Estas observações são importantes e indicam a necessidade de um estudo mais aprofundado com relação a interferência das dimensões do corpo de prova nas medidas de resistividade elétrica em laboratório. Tendo em vista que este entendimento se mostra necessário para uma futura aplicação das técnicas de resistividade elétrica na avaliação e controle de solos compactados.

4.7 ENSAIOS MECÂNICOS

No campo, os materiais usados em pavimentação são geralmente compactados próximos a condição ótima de umidade e peso específico aparente seco máximo determinadas no ensaio Proctor, ficando a cargo do controle de compactação a verificação e liberação da pista compactada, desde que esta esteja de acordo com o previsto em projeto. Tal controle deve ser o mais rigoroso possível tendo em vista que pequenas modificações nas condições de compactação do solo podem gerar grandes modificações em seus parâmetros de resistência. Desta forma, como o estudo desta dissertação visa subsidiar uma nova técnica para aplicação em controle de compactação, neste item fez-se um estudo da variação dos parâmetros de resistência do solo utilizado com a variação de suas características de compactação, buscando verificar o quão sensível são estes parâmetros frente as variações das condições de compactação.

Destaca-se que, assim como nos processos de secagem e umedecimento, os ensaios mecânicos só foram executados em 16 dos 20 corpos de prova compactados, não sendo realizado tais ensaios nos corpos de prova 1N, 1M, 3M e 6M.

4.7.1 Mini-CBR e Compressão Simples

As Figuras 4.45 a 4.50 apresentam as curvas carga x penetração, obtidas nos ensaios de mini-CBR, e tensão x deformação, obtidas nos ensaios de compressão simples, nas energias de compactação Proctor normal, intermediária e modificada, respectivamente.

A Tabela 4.12 apresenta os valores de mini-CBR e resistência última à compressão simples, para os 16 corpos de prova ensaiados.

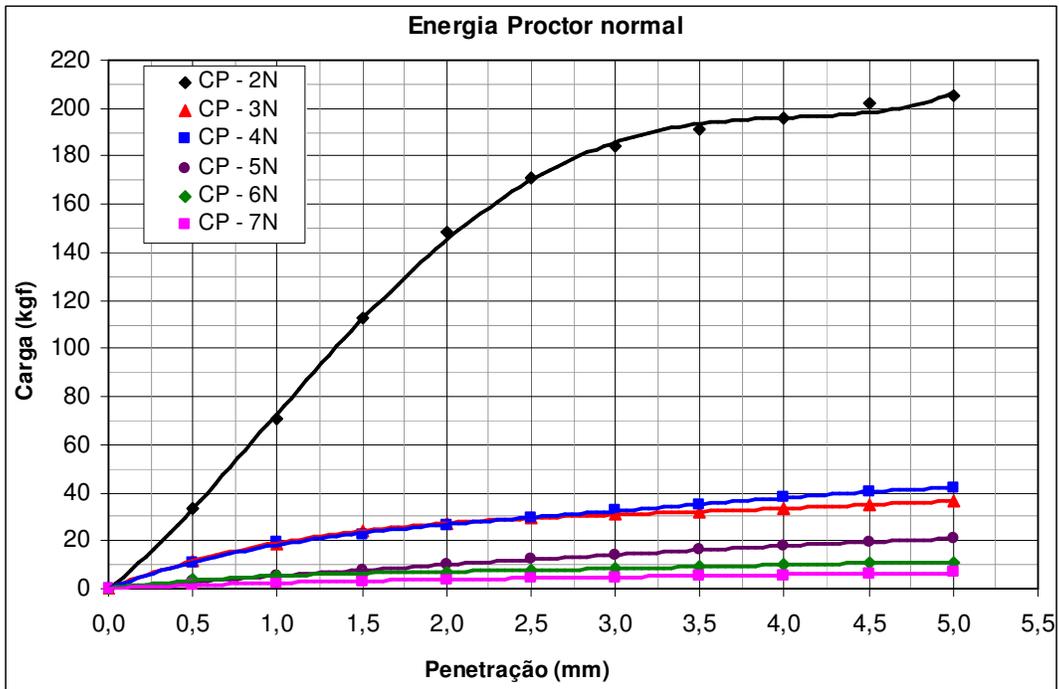


Figura 4.45 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor normal.

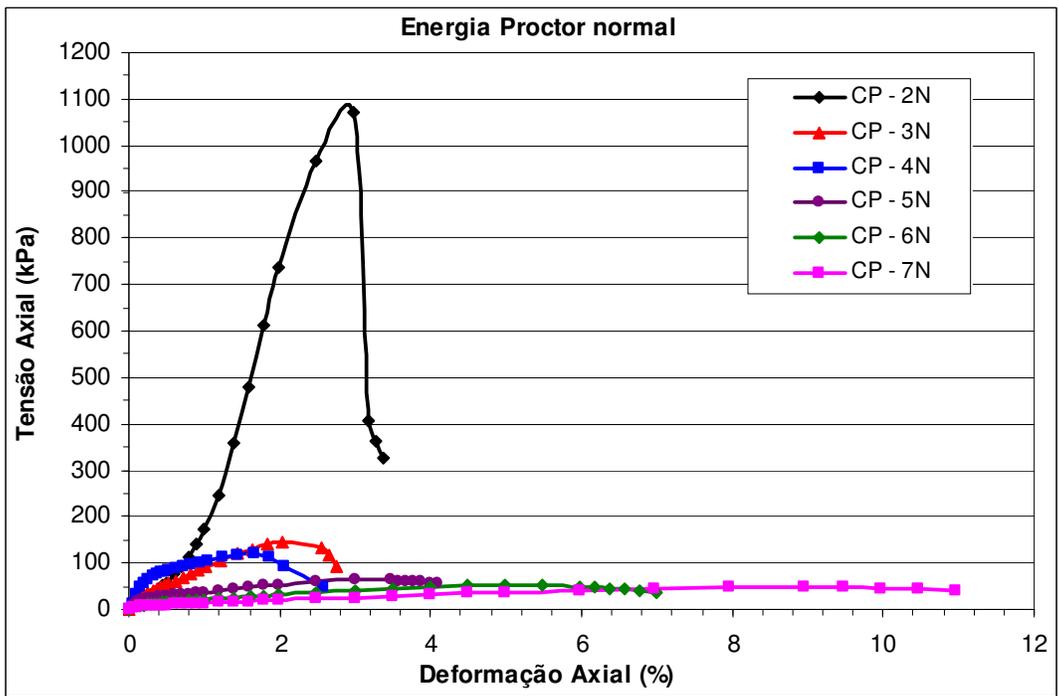


Figura 4.46 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor normal.

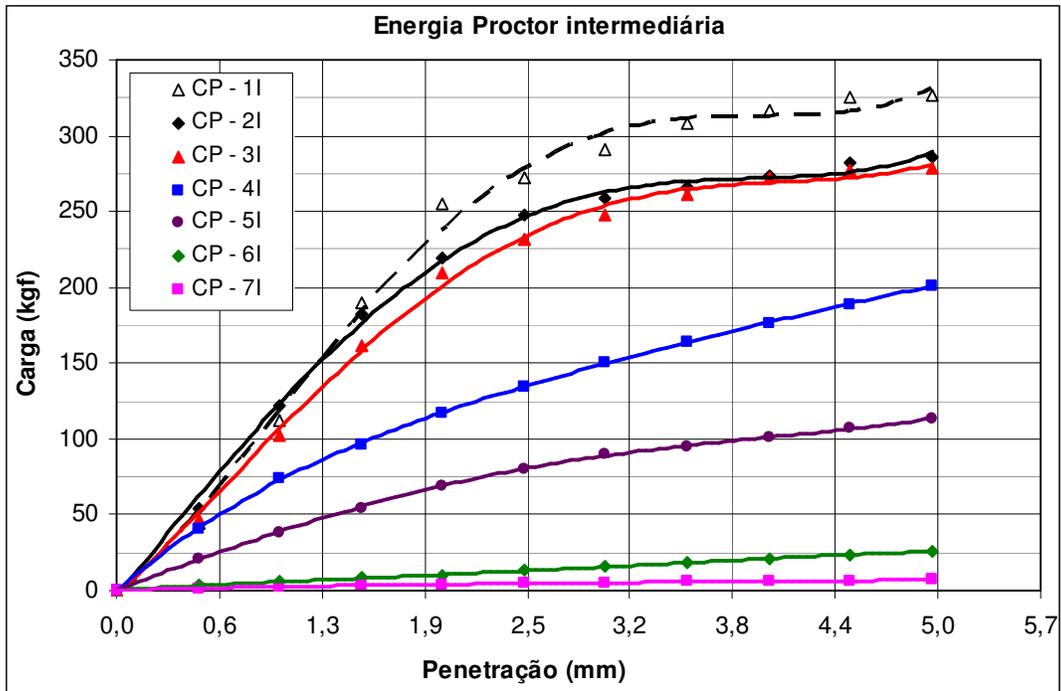


Figura 4.47 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor intermediária.

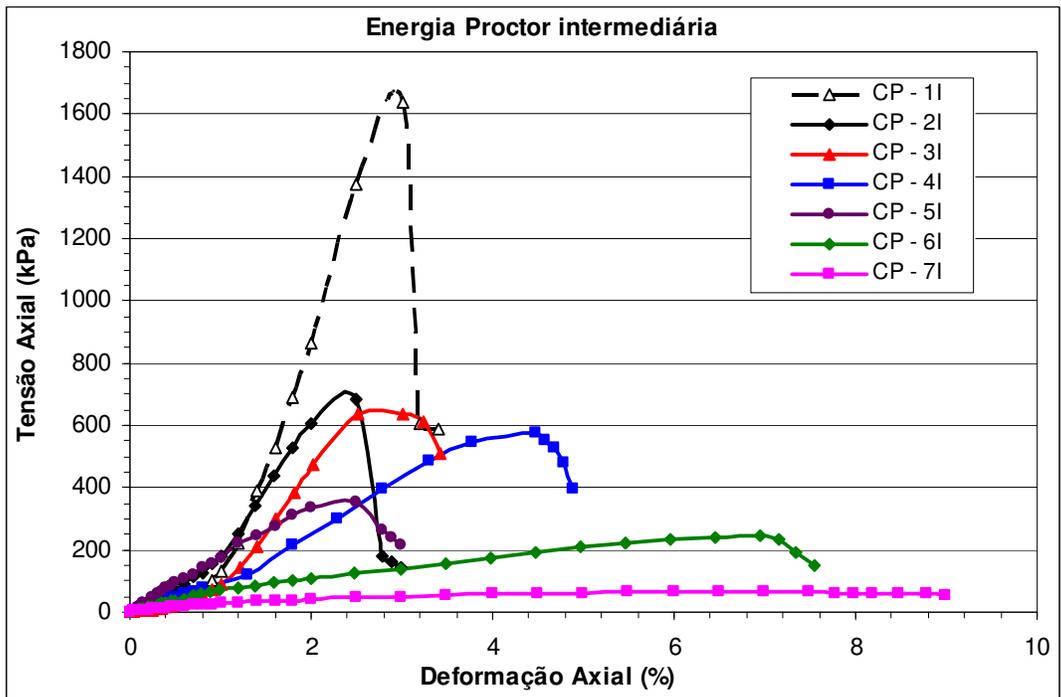


Figura 4.48 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor intermediária.

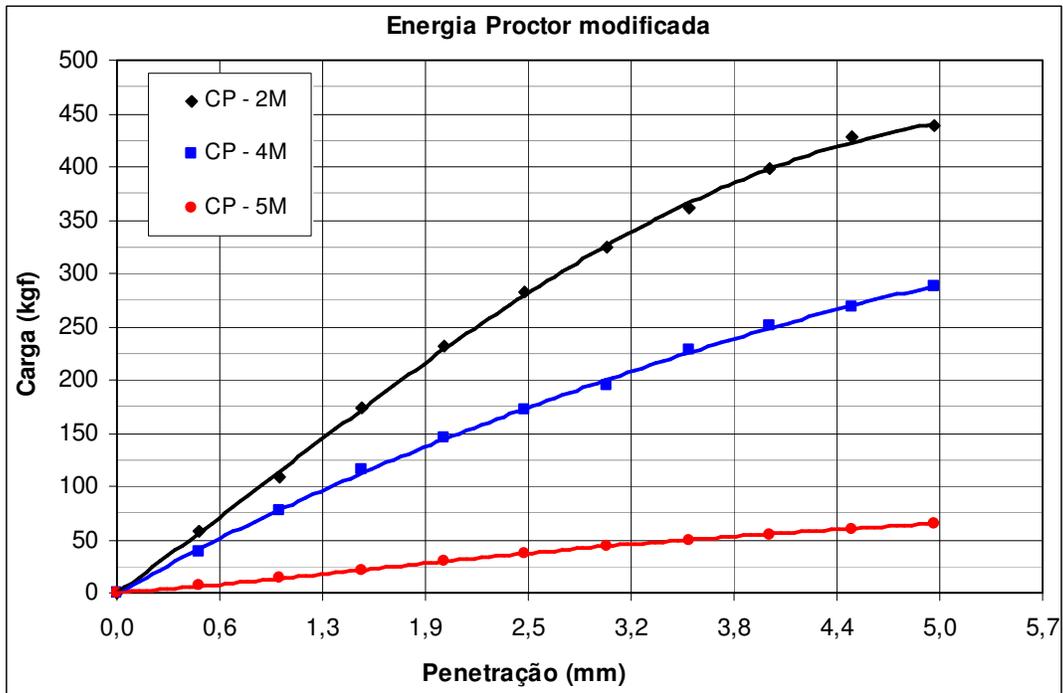


Figura 4.49 Curvas carga x penetração – ensaio de mini-CBR – energia Proctor modificada.

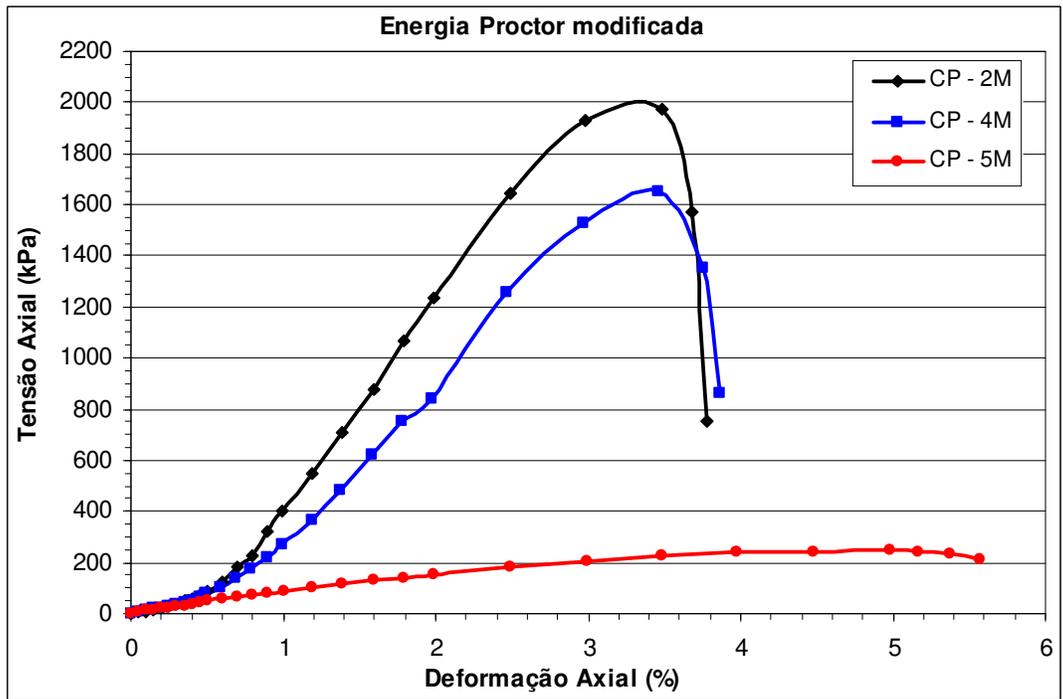


Figura 4.50 Curvas tensão x deformação – ensaio de compressão simples – energia Proctor modificada.

Tabela 4.12 Valores de mini-CBR e resistência última à compressão simples.

Energia	Nome / Ponto	Mini-CBR (%)	Resistência a Compressão Simples (kPa)
Proctor normal	2N	54	1073
	3N	18	145
	4N	11	120
	5N	5	64
	6N	3	52
	7N	2	48
	Proctor intermediária	1I	84
2I		77	684
3I		72	636
4I		46	574
5I		27	352
6I		5	244
7I		2	64
Proctor modificada	2M	87	1972
	4M	55	1653
	5M	13	245

As Figuras 4.51 e 4.52 apresentam a variação do mini-CBR e da resistência última à compressão simples com os teores de umidade de compactação, nas três energias utilizadas. Verifica-se nestas figuras que tanto os valores de mini-CBR quanto a resistência à compressão simples tendem a diminuir com o aumento da umidade de compactação, independente da energia de compactação utilizada. Nos ensaios de mini-CBR, o fato de as curvas estarem quase sobrepostas indicam a pequena influência da energia de compactação na variação do mini-CBR, o que não pode ser observado nos ensaios de compressão simples. Nestes ensaios, a energia de compactação demonstrou grande influência sobre os valores de resistência, sendo estes tão maiores quanto maiores a energia utilizada, quando consideramos uma mesma umidade de compactação. É importante destacar nestes ensaios que a interferência da energia de compactação, ou seja, o aumento da densidade do solo é mais pronunciado para baixos valores de umidade. Para valores de umidade elevados, geralmente acima do teor de umidade ótimo, as variações da densidade do solo tendem a promover pequenas variações de sua resistência.

Segundo Camapum de Carvalho (2004) é preciso lembrar que o ponto correspondente a umidade ótima é o de oclusão da fase gasosa, para o qual a sucção é pequena e é nesse momento que se começa a gerar poro-pressão positiva quando da compactação. Sendo assim, neste ponto a sucção é pequena e saturar o solo geralmente não faz grande diferença no comportamento mecânico, a não ser que outros fenômenos como os relativos à geração de poro-pressão e à estabilidade estrutural dos agregados intervenham nos resultados.

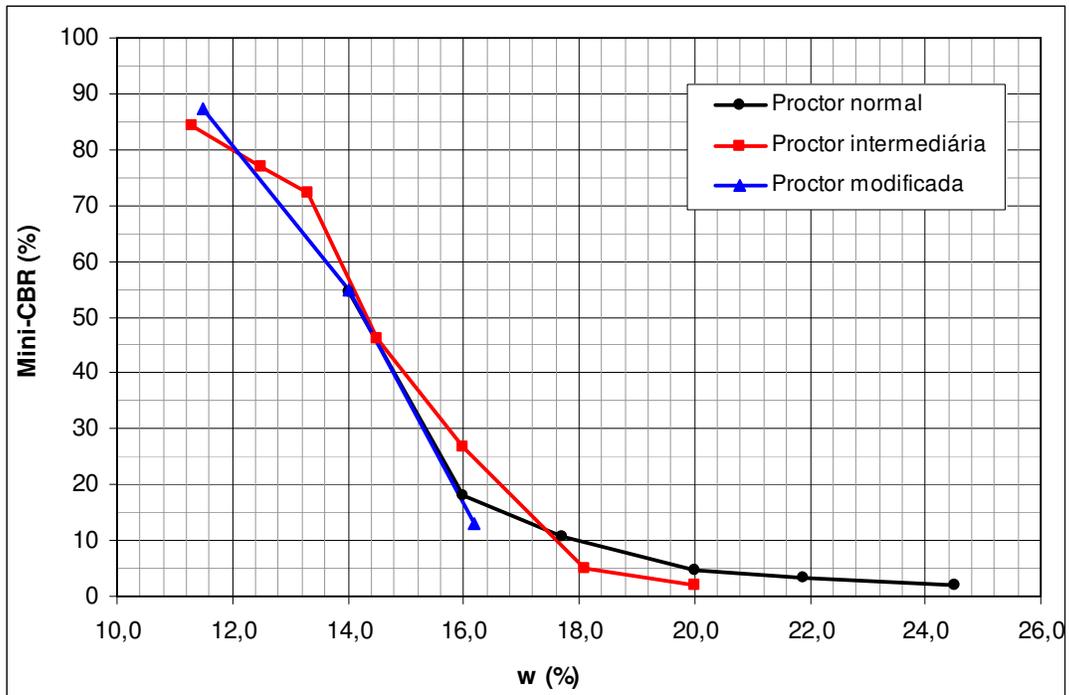


Figura 4.51 Variação do mini-CBR com a umidade de compactação.

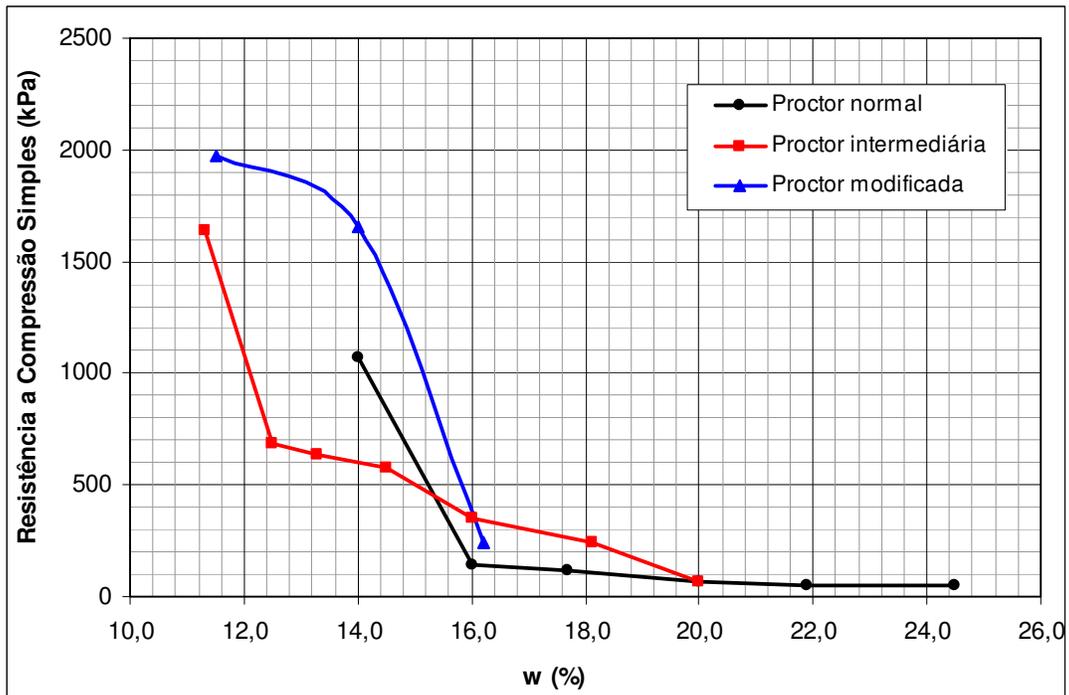


Figura 4.52 Variação da resistência última à compressão simples com a umidade de compactação.

As Figuras 4.53 e 4.54 apresentam a variação do mini-CBR e da resistência última à compressão simples com os teores de umidade de compactação, para os corpos de prova com mesmo índice de vazios.

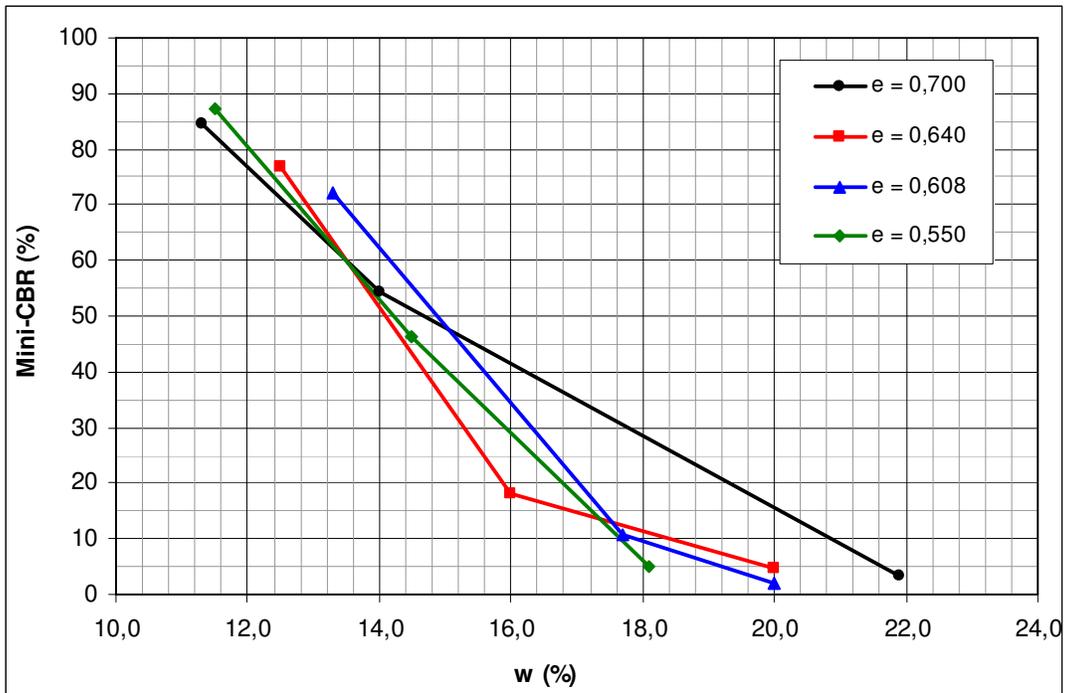


Figura 4.53 Variação do mini-CBR com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

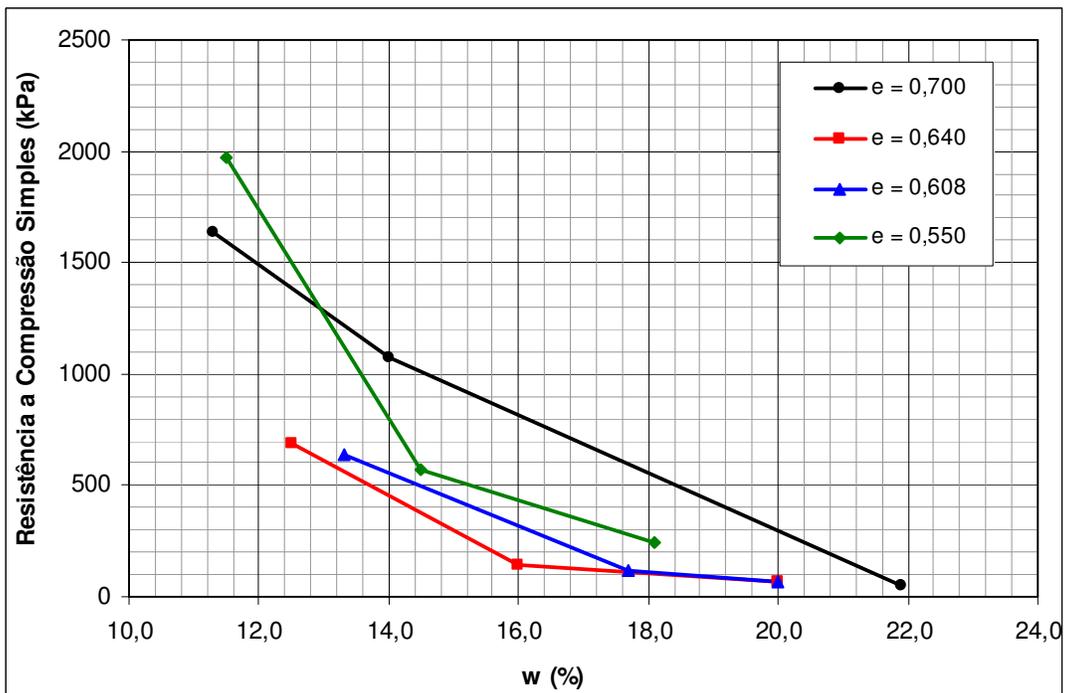


Figura 4.54 Variação da resistência última à compressão simples com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

Nas Figuras 4.53 e 4.54 fica clara a interferência da umidade nos valores dos parâmetros de resistência do solo estudado, tendo em vista que, mantendo-se o mesmo índice

de vazios, os valores de mini-CBR e resistência à compressão simples tendem a diminuir com aumento da umidade, evidenciando a contribuição da sucção no comportamento mecânico da amostra estudada.

4.7.2 Módulo de Resiliência (M_R) e Módulo Tangente Inicial (E_i)

Na Tabela 4.13 estão apresentados os valores dos módulos de resiliência obtidos por meio dos ensaios triaxiais cíclicos e dos módulos tangentes iniciais obtidos por meio dos ensaios de compressão simples. As Figuras 4.55 e 4.56 apresentam a variação dos módulos tangente inicial e de resiliência com os teores de umidade de compactação, nas três energias utilizadas.

Destaca-se que os valores dos módulos tangentes iniciais foram obtidos de forma gráfica analisando as curvas tensão-deformação e que para esta análise foram desprezados os pontos iniciais correspondentes a eventuais ajustes do equipamento.

O módulo de resiliência é normalmente representado por meio de modelos de caracterização ou constitutivos. Dentre estes modelos, destaca-se o Modelo Universal de Uzan-Witczak, onde o módulo de resiliência é função do primeiro invariante de tensão e da tensão cisalhante octaédrica. O modelo é dito universal uma vez que se aplica a qualquer material não tratado, já que o modelo incorpora os efeitos das tensões desvio e confinante. Nesta dissertação optou-se por analisar os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos por meio do Modelo Universal, que é representado pela Equação 4.6.

$$M_R = K_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct} + 1}{P_a}\right)^{K_3} \quad (4.6)$$

Onde:

K_1, K_2 e K_3 = constantes do modelo;

θ = primeiro invariante de tensão ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);

τ_{oct} = tensão cisalhante octaédrica $\left(\tau_{oct} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}\right)$.

Tabela 4.13 Valores dos módulos de resiliência e tangente inicial obtidos por meio dos ensaios mecânicos.

Energia	Nome / Ponto	Módulo de resiliência ⁽¹⁾ (MPa)	Módulo tangente inicial - E _i (MPa)
Proctor normal	2N	152,3	35,0
	3N	60,3	14,5
	4N	118,2	15,4
	5N	81,7	16,1
	6N	75,7	4,7
	7N	60,4	2,6
	Proctor intermediária	1I	152,4
2I		128,3	28,9
3I		183,1	26,5
4I		60,4	18,0
5I		116,8	15,1
6I		68,8	7,0
7I		65,0	2,8
Proctor modificada	2M	183,2	92,7
	4M	116,6	49,6
	5M	104,6	9,3

(1): Módulo de resiliência na tensão atmosférica / igual a K₁.

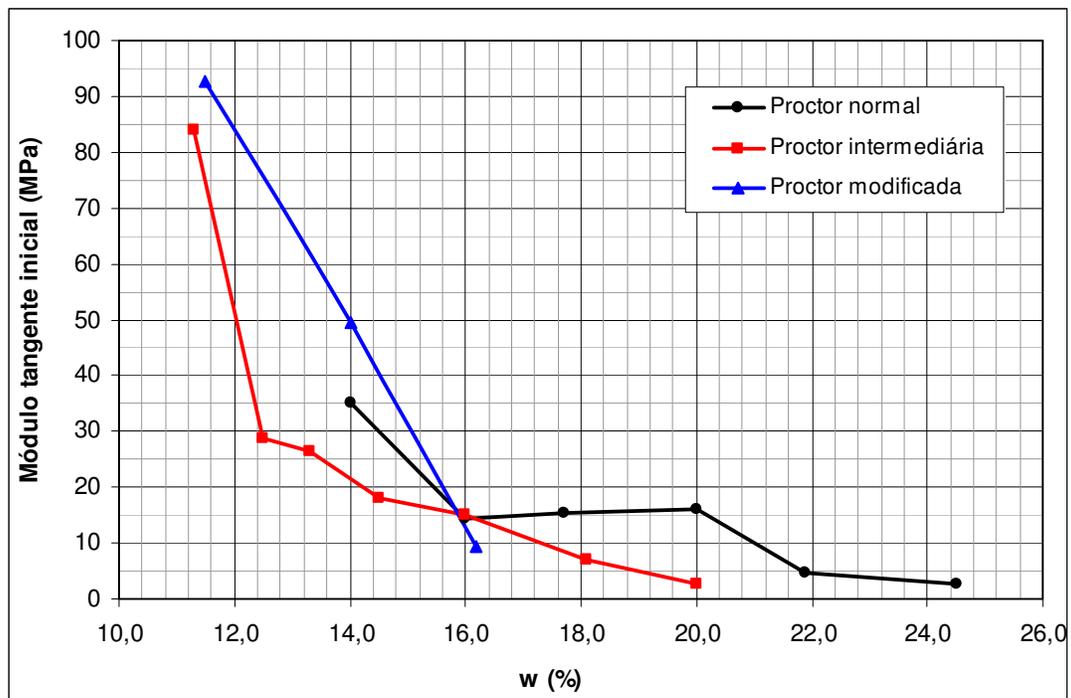


Figura 4.55 Variação do módulo tangente inicial com a umidade de compactação.

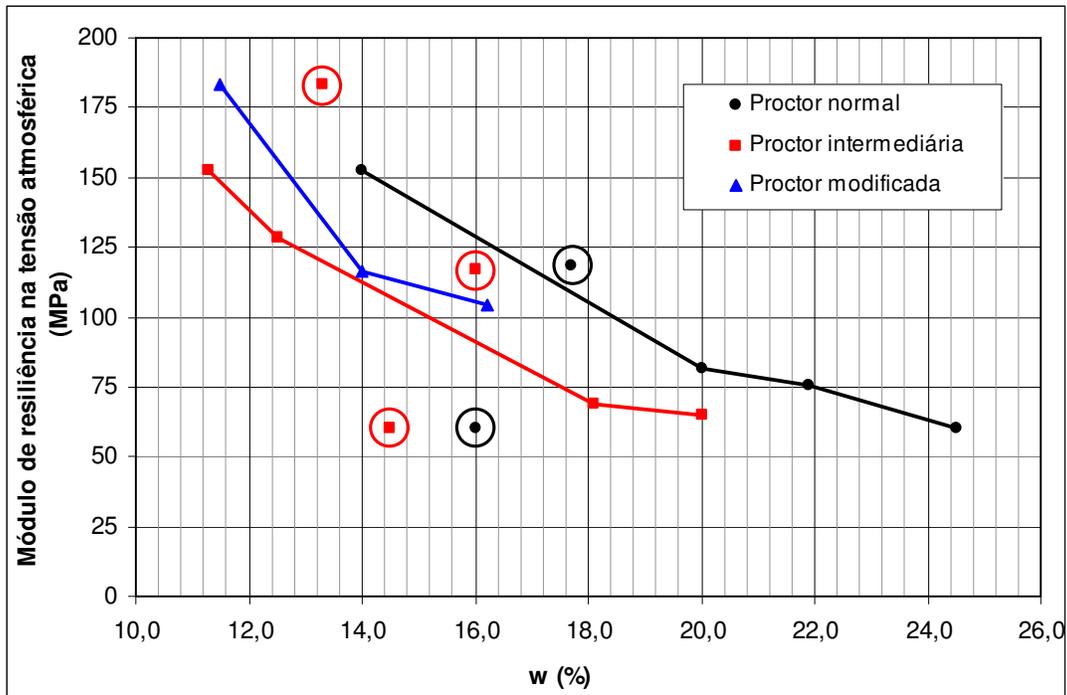


Figura 4.56 Variação do módulo de resiliência com a umidade de compactação.

Verifica-se nas Figuras 4.55 e 4.56 que, da mesma forma que os parâmetros de resistência, os parâmetros de deformabilidade da amostra estudada se mostram sensíveis à variação da umidade de compactação, sendo essa sensibilidade também maior nos teores de umidade mais baixos.

Destaca-se que os pontos marcados na Figura 4.56 apresentam-se fora da tendência de comportamento esperada. Tanto o módulo de resiliência quanto o módulo de elasticidade representam o comportamento do solo do ponto de vista da deformabilidade, espera-se que essas características tenham o mesmo comportamento quanto à variação de umidade do solo. Desta forma, a reavaliação desses resultados ou até mesmo a repetição dos ensaios se mostra necessária.

As Figuras 4.57 e 4.58 apresentam a variação dos módulos tangente inicial e de resiliência com os teores de umidade de compactação, para os corpos de prova com mesmo índice de vazios. Novamente os resultados apresentados demonstram a interferência da umidade nos valores dos parâmetros de deformabilidade do solo estudado, tendo em vista que, mantendo-se o mesmo índice de vazios, os valores dos módulos tangente inicial e de resiliência tendem a diminuir com o aumento da umidade, evidenciando a contribuição da sucção no comportamento mecânico da amostra estudada.

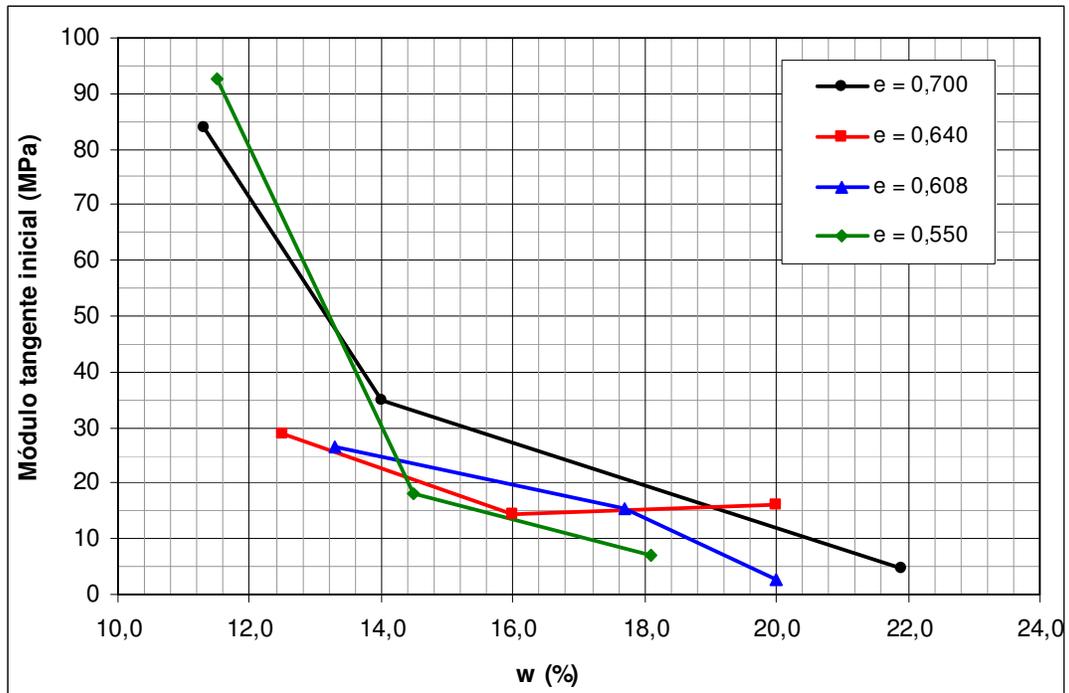


Figura 4.57 Variação do módulo tangente inicial com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

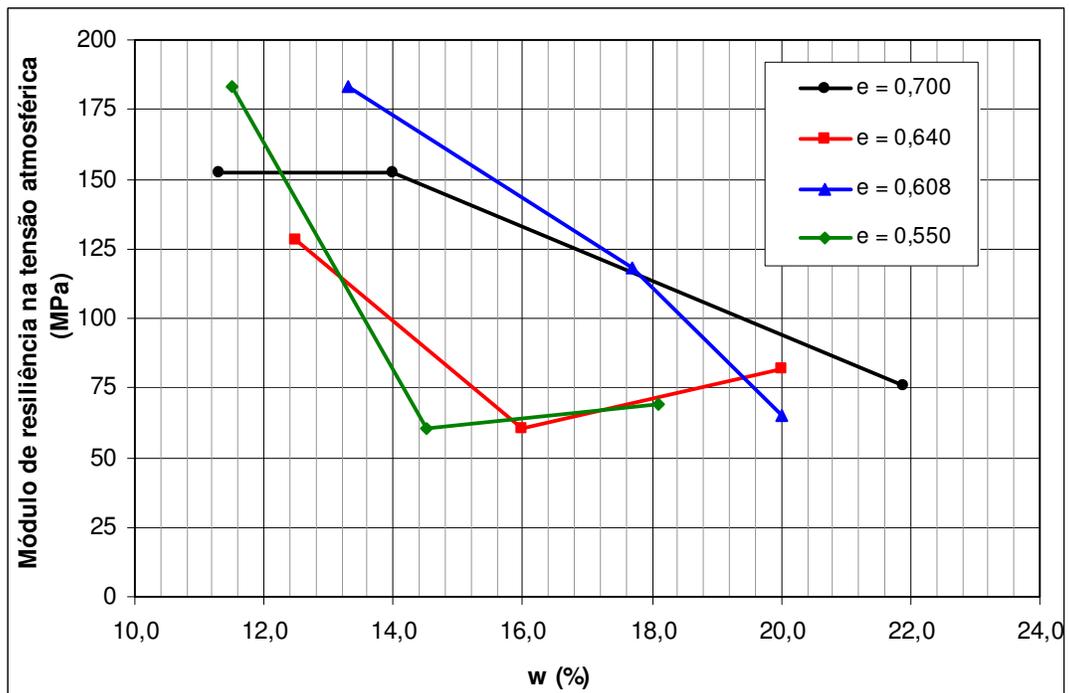


Figura 4.58 Variação do módulo de resiliência com a umidade de compactação – corpos de prova de mesmo índice de vazios.

Os resultados das análises mecânicas apresentados apontam para uma grande sensibilidade da amostra estudada frente à variação de sua condição de compactação,

principalmente no que se refere à variação de umidade. Onde os resultados demonstraram que nos trechos da curva de compactação anteriores à umidade ótima, pequenas variações da umidade promovem grandes variações dos parâmetros de resistência e deformabilidade da amostra estudada. Ou seja, pequenas variações de peso específico e umidade podem afetar em proporções inaceitáveis os resultados para um estudo paramétrico em termos de deformação e fluxo, por exemplo.

Todo o exposto acima evidencia ainda mais a necessidade de um rigoroso controle de compactação em campo. Desta forma, além de praticidade e rapidez de execução, as técnicas alternativas para controle de compactação em campo devem ser precisas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

No estudo realizado verificou-se que a relação entre a diferença de potencial (ddp) e a corrente elétrica é linear, indicando que apesar de a amostra compactada ser um meio heterogêneo particulado formado por três materiais - solo água e ar, esta apresenta para, os níveis de ddp aplicados, um comportamento eletroresistivo condizente com o modelo proposto pela Lei de Ohm.

Os valores de resistividade elétrica obtidos foram superiores aos comumente apresentados na literatura, podendo este fato estar associado à porcentagem de areia presente na amostra. Outro fato, também relevante para o aumento da resistividade elétrica, foi a utilização da água de abastecimento no processo de compactação, tendo em vista que esta possui salinidade praticamente nula afetando diretamente seu potencial de condutividade elétrica.

Verificou-se uma boa relação entre os índices físicos (grau de saturação, teores de umidade volumétrica e gravimétrica) e a resistividade elétrica dos corpos de prova. Verificou-se ainda, que o grau de saturação não é o principal condicionante da resistividade elétrica, pois os resultados apresentados mostraram que os corpos de prova com mesmo grau de saturação podem apresentar resistividades elétricas diferentes.

Os resultados demonstraram que não há uma correlação direta entre a resistividade elétrica e peso específico aparente seco e índice de vazios.

Salienta-se que, para a amostra estudada, mantendo-se a mesma umidade e aumentando a densidade do solo a tendência da resistividade elétrica é diminuir, justamente porque nesse processo aumenta-se a umidade volumétrica do solo. Logo, o principal condicionante da resistividade elétrica do solo estudado é sua umidade volumétrica.

Na relação entre condutividade elétrica do conjunto solo + ar + água e umidade volumétrica, quando a umidade volumétrica do solo for igual a 100%, ou seja, todo o volume for preenchido por água, a condutividade elétrica do conjunto será igual ou aproximadamente igual a condutividade elétrica da água, logo, o valor da condutividade elétrica do conjunto será 100% o valor da condutividade elétrica da água intersticial. No entanto, esta variação não se dá de forma linear e sim de forma exponencial.

Os resultados apresentados demonstraram que a correção da resistividade elétrica do corpo de prova em função da resistividade do líquido intersticial fez com que os valores de

resistividade elétrica dos corpos de prova compactados com águas em diferentes salinidades se aproximassem.

Para todos os corpos de prova analisados, independente da energia de compactação, a relação entre resistividade elétrica e sucção matricial apresenta dois comportamentos distintos. Verificou-se a existência de uma relação direta e linear entre resistividade elétrica e sucção matricial no trecho situado antes do valor de sucção correspondente ao valor de entrada de ar nos microporos. Após este ponto, os valores de resistividade aumentam substancialmente e a relação apresenta outro comportamento.

Verificou-se que o processo de secagem e umedecimento não influenciou de forma significativa o comportamento da resistividade elétrica dos corpos de prova frente à variação da umidade volumétrica. Observou-se uma boa relação entre a resistividade elétrica e o teor de umidade volumétrica para os corpos de prova de 2” e que para uma mesma umidade volumétrica os corpos de prova de 6” apresentaram valores de resistividade elétrica superiores.

Os resultados das análises mecânicas apresentados apontam para uma grande sensibilidade da amostra estudada frente à variação de sua condição de compactação, principalmente no que se refere à variação de umidade. Esses resultados evidenciam a necessidade de um rigoroso controle de compactação em campo, logo as técnicas alternativas para controle de compactação em campo devem ser precisas, além de oferecem praticidade e rapidez.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O estudo realizado limitou-se a uma única amostra. Sugere-se a realização do mesmo estudo utilizando-se amostras com características diferentes no que se refere à granulometria e à salinidade.

Realizar o estudo com águas de diferentes salinidades buscando a correção da resistividade elétrica do corpo de prova pela resistividade elétrica da água, em outras condições de compactação.

Avaliar a sensibilidade da calibração do método, ou seja, como o erro gerado no processo de calibração da resistividade elétrica com os teores de umidade gravimétrica e volumétrica pode afetar o comportamento mecânico do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HASSANEIN, Z.S.; BENSON, C.H. **Using Electrical Resistivity for Compaction Control of Compacted Soil Liners**. Proceedings of the First International Conference on Tailings & Mine Waste'94, 1994, pp. 177-188.

ABU-HASSANEIN, Z.S.; BENSON, C.H. & BLOTZ, L.R. **Electrical Resistivity of Compacted Clays**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, nº 5, 1996, pp. 397-406.

AGUIAR, L.A. **Contribuições para a Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados para uso em Barragens**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010, 127p.

AUBERTIN, M., RICARD, J-F., CHAPUIS, R.P. **Predictive Model for the Water Retention Curve: Application to Tailing from Hard-Rock Mines**. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(1).

AQUINO, F.R.; AGUIAR, L.A.; GUIMARÃES, R.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Avaliação do Comportamento da Curva de Compactação de dois Solos Tropicais Utilizando Amostras Naturais e com Secagem Prévia**, in: IV Simpósio de Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro-Oeste e de Minas Gerais. Uberlândia, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 1984 a, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 1984 b, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 1984 c, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 1984 d, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 1984 e, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 1986 a, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986 b, 10p.

ASSHTO T 307. **Standard method of test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials**. American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, 1999, USA, 26 p.

ASTM, **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. ASTM D 5298, 2003.

BARATA, F. E.. **Considerações sobre atividade coloidal das argilas e solos argilosos**. V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. São Paulo - SP, 1974, Vol. 2, p.223 - 237.

BATISTA, L.C.M. **Determinação de parâmetros de deformabilidade de camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007, 177p.

BORMER, R., WARD, S.H. MORRISON, H.F. **On Induced Electrical Polarization and Groundwater**. Geophysics, v33 n 5, 1968, pp 805-821, October

BOSZCZOWSKI, R.B., SILVA, J.M. **Avaliação da Resistividade Elétrica de um Perfil de Solo Residual em Função do Intemperismo e Teor de Umidade**. XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba-PR, 2006.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Propriedades e Comportamento de Solos Tropicais Não Saturados**. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, SP, 2004, Vol. 2, 597-616.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R. C.; CARDOSO, F. B. F.; PEREIRA, J. H. F. **Proposta de uma Metodologia para Ensaios de Sedimentação**, in: 30ª Reunião Anual de Pavimentação. Salvador, 1996, 520-531p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. **Modelo de Normalização da Curva Característica**. In: 32 Reunião Anual de Pavimentação, 2000, Brasília.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. **Curva Característica de Sucção Transformada**. Solos e Rochas, 27(3): 231-242, 2004.

CAMPANELLA, D. R. G., KRISTIANSEN, H., DANIEL, C., DAVIES, M. P. **Site Characterization of Soils Deposits Using advances in Piezocone Technology**. In Proceedings of the 1st Conference on Geotechnical Site Characterization, 1998, pp 995-1000, Georgia, USA

CAMPANELLA, R.G., WEEMES, I. **Development and use of an Electrical resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies**. Journal of Canadian Geotechnics. v. 27, 1990, pp 557-567.

CARDOSO, F.B.F., MARTINS, E.S., FARIAS, W.M. & CAMAPUM DE CARVALHO, J.. **Papel dos oxi-hidróxidos de Fe e de Al no grau de agregação de solos do Distrito Federal**. I Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Brasília - DF, 2003, Vol. único, p.137-144.

CONAMA 357/2005 – **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 23 p.

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

DNER-ME 256/94 – Solos **compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão**, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, 6 p.

DNER-ME 258/94 – **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, 14 p.

DNER-ME 131/94 - **Solos – determinação do módulo de resiliência**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 8 p.

DNER-ME 254/94 – **Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 14 p.

DNER- ME 040/95 – **Prospecção geofísica pelo método de eletrorresistividade**, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 17 p.

EMBRAPA **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Centro Nacional de Pesquisa do Solo, 2ª edição, Rio de Janeiro, RJ, 1997, 212p.

FERREIRA, J.G.H.M. **Elaboração e análise de base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, 2002, 130p.

FORTES, R.M. **Método Expedito de Identificação MCT de Solos Tropicais, Para Finalidades Rodoviárias, Utilizando-se Anéis de PVC Rígido**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1990, 210p.

FUKUE, M.; MINATO, T.; HORIBE, H. & TAYA, N. **The Micro-structures of Clay Given by Resistivity Measurements**. Engineering Geology 54, 1999, pp. 43-53.

FUTAI, M.M. **Estudo teórico e experimental do comportamento de solos não saturados, aplicação ao caso de voçorocamento**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, R. J. Rio de Janeiro, 2002, Brasil

GIROTTO, E.M.; SANTOS, I.A. **Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente**, Química Nova, Vol. 25, nº 4, 2002, 639-647p.

GUIMARÃES, R.C. **Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas**. Dissertação de mestrado. Publicação nº G. DM – 090A/02, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002, 183p.

JACINTHO, E.C. **Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para uso em Barragens**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-132/05, Departamento de Engenharia e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005, 160p.

KALINSKY, R.J. & KELLY, W.E. **Electrical-Resistivity Measurements for Evaluating Compacted-Soil Liners**. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, Nº 2, 1994, pp. 451-457.

KOMESU, I. **Controle de Compactação, uma Nova Abordagem do Método de Hilf**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, EPUSP, São Paulo, SP, 2001, 127 p.

LAMBE, T. S.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: John Wiley, 1969, 553p.

LENC - Laboratório de Engenharia e Consultoria. **Método das pastilhas para identificação expedita do grupo MCT**, São Paulo, SP, 1997, 9p.

LUNNE, T. ROBERTSON, P.K. & POWELL, J. **Cone Penetration Test in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional**, London, 1997, 311p.

MARINHO, F.A.M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção**. Encontro sobre Solos Não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 112-125, 1995.

MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2ª edição, 2005, 570 p.

MIRANDA NETO, M.I. **Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais**. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002, Brasil.

MONDELLI, G.; GIACHETI, H.L.; ELIS, V.R.; HOWIE, J.A. **Desenvolvimento de um Sistema para Medida da Resistividade Elétrica de Amostras Indeformadas em Laboratório**. XIV COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica, Búzios, RJ, 2008.

NACCI, D.; GAMBIM, R.L.; SCHNAID, F. **Propriedades Elétricas de Solos Contaminados**. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, PUC, Porto Alegre – RS, 2003.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais**. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu, PR, 1994, Vol. 4, p.1293-1300.

NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Ed. Villibor, São Paulo, SP, 1995, 240p.

PACHECO, A.O. **Aplicação do cone resistivo em solos saturados**. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004, 150p.

PEIXOTO, A.S.P.; PREGNOLATO, M.C.; SILVA, A.C.C.L.; YAMASAKI, M.T.; CONTE JUNIOR, F. **Development of an electrical resistivity measure for geotechnical and geoenvironmental characterization**. CPT'10 – 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, California, USA, 2010.

PEREIRA, J.H.F. e MARINHO, F. **Apostila do Curso de Mecânica dos Solos Não Saturados**. XI COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Geotecnia, Brasília, DF, 1998.

PESSOA, F.H.C., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GOUVEIA, L.A. **Análise das propriedades físico-químicas, micro-estruturais e mecânica de um solo fino estabilizado com cal**. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, 1: 251-260, 2005.

QUEIROZ, A.C.G. **Uso do DMT na Avaliação de Maciços Compactados**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008, 96p.

ROBERTSON, P.K., LUNNE, T.; POWELL, J.J.M. **Geo-Environmental Applications of Penetration Testing. Invited Theme Lecture**, ISC '98, Atlanta, Georgia, April 1998.

ROSENO, J.L., CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser**. III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Cuiabá, MT, 2007, 53p.

SCREEDEEP, S.; RESHMA, A.C. & SINGH, D.N. **Measuring Soil Electrical Resistivity Using a Resistivity Box and a Resistivity Probe**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, Nº 4, 2004, pp. 411-415.

SÓRIA, M. H. A. **Os limites de Atterberg, o argilomineral e o teor de argila**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Porto Alegre - RS, 1986, Vol. 1, p.161-171.

SOUZA SANTOS, P.S. **Tecnologia das Argilas Aplicadas as Argilas Brasileiras**, v. 1 Fundamentos. Ed Edgard Blucher. São Paulo, S.P., 1975, Brasil.

YAMASAKI, M.T.; PEIXOTO, A.S.P.; ULSON, J.A.C. **Ensaio de Laboratório para Avaliação da Resistividade Elétrica em um Solo Tropical Arenoso**. XV COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, 2010.

WATABE, T., TSUCHIDA, T., TANAKA. M., ODA, Y., SAKAI, Y. **Geo- environmental Cone Penetrometer With Efficient Ground water Sampling**. In Proceedings of the 4th Conference on Environmental Geotechnics (4th ICEG), v. 1, pp 71-76 Rio de Janeiro, 2002, Brasil, Octobre.

WEEMES, I.A. **Development of an Eletrical Resistivity Cone for Ground water Contamination Studies**. Master Thesis, Department of Civil Engineering The University of British Columbia, Vancouver, 1990, BC.